ELI DE GORTARI

DIALÉCTICA DE LA FÍSICA

ING. ADAN RAMOS BAUTISTA
UNAM
CAMPUS ACATLAN
GEOTECNIA

TRATADOS Y MANUALES
GRIJALBO

EDITORIAL GRIJALBO, S. A.
México, D. F.

DIALECTICA DE LA FISICA

© 1964, ELI DE GORTARI
(edición original de la U. N. A. M.)

D. R. © 1979, sobre la presente edición por
EDITORIAL GRIJALBO, S. A.
Av. Granjas 82, México 16, D. F.

PRIMERA EDICIÓN

Reservados todos los derechos. Este libro no puede ser reproducido, en todo o en parte, en forma alguna, sin permiso.

ISBN 968-419-077-8

IMPRESO EN MÉXICO HECHO EN MEXICO PRINTED IN MEXICO

ÍNDICE

Preámbulo 7

I. *Introducción*

1. Significación de las categorías 11
2. Situación actual de las teorías físicas 15
3. Problemas de la teoría cuántica 20
4. Necesidad de establecer nuevas categorías . 25
5. Correspondencia entre los niveles de la existencia 31

II. *La categoría de espacio*

6. Noción del espacio 36
7. La incertidumbre de la posición espacial . 39
8. Extensión y cantidad de movimiento 45
9. Espacio y tiempo 50
10. Dimensionalidad del espacio 54
11. Caracteres cuánticos del espacio 59
12. Discontinuidad cinemática 62
13. Politopía y homotopía 65
14. Reflexión especular 69
15. Geometría discontinua 74
16. Espacio microcósmico 77

III. *La categoría de tiempo*

17. Noción del tiempo 81
18. Conjugación de energía y tiempo 85
19. Localización y condiciones dinámicas 89
20. Generalización de las propiedades locales . 91
21. El orden de las conexiones causales 93
22. Dimensionalidad del tiempo 96
23. Sentido único del tiempo 98
24. Irreversibilidad de la duración 104
25. Cuantización del tiempo 108

26. Dominio de la cronotópica 113
27. Tiempo microcósmico 116

IV. *La categoría de energía*

28. Caracterización de la energía 119
29. Determinación científica del movimiento . 120
30. La energía mecánica 122
31. La medida del movimiento 125
32. Conservación y transformación de la energía 129
33. Entropia y anentropia 131
34. Principios de conservación 133
35. La inercia de la energía 136
36. Temporalidad de la energía 139
37. Energía interna de los átomos 141
38. Energía de la cohesión molecular 145
39. Energía interna de los núcleos 149
40. Significación de la energía 151

V. *La categoría de movimiento*

41. Noción del movimiento 154
42. Leyes clásicas del movimiento 157
43. Universalidad y relatividad del movimiento 160
44. Caracterización de la masa 167
45. La masa de las partículas elementales 172
46. La cantidad de movimiento 176
47. Conservación de la cantidad de movimiento 180
48. Cuantización de la cantidad de movimiento 184
49. Cantidad de movimiento y longitud de onda. 190
50. Conjugación de las propiedades dinámicas 193

VI. *La categoría de causalidad*

51. Noción de la causalidad 198
52. El determinismo clásico 199
53. Convergencia hacia el determinismo 202

54. La causalidad en la física relativista 204
55. El indeterminismo de la teoría cuántica .. 207
56. La causalidad en los procesos microcósmicos 212
57. Caracterización contemporánea de la causalidad 215
58. Temporalidad de las conexiones causales . 219
59. Relaciones causales multívocas y biunívocas 223
60. Interconexión de azar y causalidad 226
61. La causalidad como fundamento de la ciencia 230
Indice de nombres 233

ING. ADAN RAMOS BAUTISTA
UNAM 0 OCT 2003 CAMPUS ACATLAN
GEOTECNIA

PREAMBULO

Como consecuencia de los extraordinarios avances experimentales y teóricos realizados en nuestro siglo; especialmente a partir del descubrimiento del cuanto de acción por Planck en 1900 y de la primera formulación de la relatividad por Einstein en 1905, la física se encuentra dividida actualmente en tres grandes niveles: el macrocosmos; correspondiente a las masas, energías y velocidades enormes, de las cuales se ocupa la física relativista; el mesocosmos; que comprende los procesos de dimensiones comparables a las humanas; en donde se cumplen simultáneamente la física relativista; la clásica y la cuántica; y el microcosmos, al cual pertenecen las masas diminutas con energías y velocidades sumamente grandes, que constituye el dominio de la física cuántica. También sabemos que existen cuatro tipos fundamentales de energía: la de la cohesión nuclear y las interacciones fuertes entre las partículas elementales, la de las interacciones débiles entre las mismas partículas, la energía electromagnética y la energía gravitacional. Sin embargo, a pesar de los muchos esfuerzos que se han hecho hasta ahora, no ha sido posible establecer una teoría general única para explicar conjuntamente esas cuatro energías y, por lo tanto, para dar cuenta satisfactoriamente del comportamiento de todos los procesos físicos.

La situación en que se encuentra la física se puede resolver en parte con la transformación de sus categorías fundamentales, ya que las que se consideran como tales hasta ahora, han mostrado muchas insuficiencias, inconsecuencias y limitaciones. Además, la acumulación tremenda y cada día mucho mayor de resultados experimentales, que carecen de una explicación teórica adecuada, impone con urgencia la necesidad de abordar ese problema y de tratar de contribuir a su solución. Para ello, es indispensable examinar con rigor y criticar radicalmente las bases de los argumentos que han llevado a establecer interpretaciones defi-

cientes. Y, para ejecutar esa tarea, se requiere la colaboración y el esfuerzo común de los físicos teóricos y los filósofos.

En este libro se hace un examen filosófico penetrante de los conocimientos adquiridos y las nociones utilizadas para interpretarlos, con el propósito de la contribuir a la formulación de las nuevas categorías de espacio, tiempo, energía, masa, velocidad, movimiento, cantidad de movimiento y causalidad en la física contemporánea. En dicho examen se parte expresamente de las nuevas propiedades descubiertas experimentalmente, por extrañas que parezcan; se emplean las nuevas posibilidades dialécticas de pensar que la misma naturaleza nos procura; y se señala la necesidad ineludible de someter los resultados a la prueba decisiva de su verificación experimental. Como se advierte fácilmente, los postulados básicos de nuestro examen han sido los de la concepción científica, materialista y dialéctica, del universo. Y, con esos postulados, en calidad de hipótesis generales por comprobar específicamente, hemos analizado con el mayor rigor cada uno de los distintos problemas estudiados, ateniéndonos exclusivamente a los conocimientos comprobados y las explicaciones fundamentadas, para concluir finalmente las interpretaciones que aquí damos, mismas que constituyen una confirmación de la concepción del mundo utilizada inicialmente como marco teórico.

Para esta nueva edición hemos hecho una revisión concienzuda, minuciosa y documentada del texto entero, incluyendo la verificación de las ecuaciones y de los valores numéricos de los datos, lo mismo que la incorporación de los nuevos conocimientos aportados en los últimos 15 años. A este respecto, ha sido motivo de gran satisfacción el haber comprobado que todos nuestros planteamientos siguen siendo válidos y que únicamente hemos tenido que introducir tres novedades en el texto. La primera, corresponde a las nuevas partículas elementales que se han descubierto, con lo cual se ha incrementado su número, se han efectuado algunas modificaciones en sus propiedades, de acuerdo con los experimentos más precisos que se han realizado, pero sin que eso afecte nuestro tratamiento. La segunda novedad estriba en la postulación de los *guarks*, hecha por Murray Gell-Mann y George Zweig en 1963, como corpúsculos todavía más pequeños y que vienen a ser los componentes de las partículas elementales,

cuyo desarrollo teórico ha permitido la determinación de varias de sus caracteristicas, como son su carga eléctrica fraccionaria, su espin, su número barionico fraccionario; su "extrañeza", su "encanto", su "color" y su "sabor". La hipótesis de los *quarks* ha servido, ademáa, para descubrir varias partículas elementales. En cuanto a los problemas abordados en este libro, tampoco han resultado afectados por eso y, entonces, simplemente hemos cambiado la expresión de que las características de la estructura interna de las particulas "apenas empieza a vislumbrarse", por la indicación de que ya se ha avanzado en el estudio de sus componentes, los *quarks*.

La tercera novedad consiste en la determinación de la masa en reposo del fotón, realizada por Leverett Davis, Alfred Scharff Goldhaber y Michael Martín Nieto en 1975. Semejante determinación ha sido motivo de particular satisfacción para quien esto escribe, ya que siempre tuvo la convicción de que era imposible que el fotón careciera de masa en reposo, por la simple y decisiva razón de que, de acuerdo con los conocimientos científicos comprobados, cualquier objeto existente tiene masa y energía; independientemente de que, conforme a la ecuación de Einstein, $E = mc^2$, ambas se pueden convertir reciprocamente una en la otra, aunque nunca se transforma toda la energía en masa, ni tampoco la masa entera en energía. Tal concepción la mantuvo el autor en varias discusiones con físicos y filósofos de la ciencia, sostenidas tanto en México como en otros países, frente a la interpretación de que la masa en reposo del fotón es nula, la cual figura en casi la totalidad de los textos y artículos que se ocupan de la cuestión, y, a la vez, era sostenida por la inmensa mayoría de los científicos y filósofos de la física Por supuesto, en el texto de la primera edición, el autor insistía en su punto de vista con tono polémico. Mientras que ahora, en cambio, las referencias a la masa en reposo del fotón se han mudado, con verdadero beneplacito, a la afirmación categórica. Además, como ha ocurrido muchas veces en el desarrollo de la ciencia y no obstante haber sido el propio Einstein, el descubridor del fotón, quien hizo la suposición de que dicha partícula tenía una masa en reposo nula, ahora se ha puesto en claro que la teoría de la relatividad no requiere de ese supuesto. Por otra parte, la posibilidad teórica de que el fotón tuviese una masa en reposo mayor que cero, ya

había sido expresada matemáticamente por Alexandre Proca en 1930. Y, por cierto, las ecuaciones de Proca resultan ser las mismas que las establecidas por Maxwell para los campos eléctrico y magnético, salvo que en dos de ellas se agrega un nuevo término en el segundo miembro.

A lo largo del libro entero, el autor se ha esmerado en hacer exposiciones claras y precisas, que resulten enteramente comprensibles para un lector provisto de una cultura media general. En particular, ha hecho un esfuerzo considerable para eludir las eucaciones en el texto, valiéndose de explicaciones en lenguaje accesible. En general, las ecuaciones que pueden ser útiles para algunos lectores, figuran en las notas al pie de las páginas y, por ende, eso significa que son dispensables para la mayoría. En el sentido indicado, ha sido muy satisfactorio saber que algunas partes de este libro han servido para apoyar ciertos desarrollos de obras posteriores, que ha sido utilizado como texto en varios cursos y que, inclusive, algunos trozos del mismo han sido tomados para formar parte de los exámenes de admisión en la Universidad Nacional Autónoma de México. Con todo, el autor quedará muy agradecido a quienes le señalen pasajes que resulten oscuros, dudosos o de comprensión difícil.

Eli de Gortari.

Junio de 1978.

I

INTRODUCCIÓN

1. *Significación de las categorías*

El concepto científico es la síntesis en la cual se expresan los conocimientos adquiridos acerca de un proceso o de un grupo de procesos. Desde su forma elemental hasta la más compleja, el concepto se establece por medio de la reconstrucción racional de los datos conocidos, los cuales son entrelazados, ordenados, organizados y constituidos en una representación unitaria, que refleja al proceso o grupo de procesos en su integridad. En esa representación quedan comprendidas tanto las propiedades de los procesos, como sus conexiones internas y sus vínculos con otros procesos. El concepto, una vez formulado, permite entender mejor los datos conocidos anteriormente y sirve, también, para descubrir otros aspectos y nuevas relaciones entre los procesos. Cuando así sucede, el concepto se enriquece con la incorporación de esos descubrimientos, incrementándose entonces la comprensión y haciéndose posible que se pongan de manifiesto nuevos aspectos y otros enlaces. Al propio tiempo, la determinación de un concepto se produce siempre en conjugación con otros conceptos, de tal manera que viene a ser determinado por ellos y, simultáneamente, sirve como determinante para ellos. En esas condiciones, el concepto se encuentra sometido a una determinación incesante y progresiva, a través de la cual se penetra cada vez más en la existencia de los procesos que dicho concepto representa.

Los conceptos formulados en el pensamiento, como resultado de la actividad científica, son abstracciones de los procesos y de sus relaciones. La abstracción consiste en considerar un proceso o un grupo de procesos desde un punto de vista único, prescindiendo de todas las demás propiedades de su existencia. Por lo tanto, abstraer es ais-

lar y destacar una propiedad respecto de otras. En todo caso, el fundamento objetivo de la abstracción se encuentra en el hecho de que el universo es susceptible de descomponerse en partes aisladas, ya sea transitoria o relativamente, sin que por ello se pierda la unidad indisoluble del propio universo. Sobre esa base objetiva, la formación del concepto se hace justamente por medio de abstracciones sucesivas, que permiten destacar las propiedades comunes de un grupo de procesos semejantes, aunque no idénticos, lo mismo que sus diversos vínculos. Como resultado de esa actividad de abstracción, las propiedades concretas de los procesos singulares se funden en la unidad general del concepto. Por lo tanto, el concepto es una cristalización del conocimiento, en la cual se condensan las propiedades comunes de un grupo de procesos, constituyendo su contenido. Dicho contenido será objetivo en tanto que el concepto refleje los rasgos y aspectos efectivamente existentes en los procesos. En consecuencia, el pensamiento sólo puede reunir y enlazar de algún modo aquellas propiedades y relaciones que estén vinculadas de un modo objetivo en los procesos representados por el concepto. Entonces, la condición ineludible para poder establecer racionalmente una conexión conceptual entre dos o más propiedades, o entre dos o más procesos, consiste en la posibilidad de su verificación en la experiencia.

Las categorías de una ciencia son los conceptos que tienen la mayor extensión dentro de ella, porque abarcan su dominio por entero. Desde el punto de vista lógico, las categorías son aquellos conceptos que quedan implicados necesariamente en todo juicio establecido dentro de la disciplina a la cual pertenecen. Por ello, las categorías sirven como discriminantes para acotar el dominio de la disciplina en cuestión. También permiten decidir si un conocimiento pertenece o no a una disciplina determinada, puesto que expresan las formas generales de existencia de los procesos estudiados por ella. De una manera general, las categorías del conocimiento científico corresponden a las modalidades fundamentales de la existencia,

en las cuales se manifiestan las relaciones sociales, las conexiones entre el hombre y la naturaleza y los enlaces internos y externos de los procesos naturales. Por su carácter general, las categorías constituyen los elementos del sistema que sirve de estructura al conocimiento científico. Este sistema de las categorías es flexible y eminentemente dinámico, porque sus elementos —las múltiples conexiones que enlazan a las formas de existencia expresadas en las categorías— se transforman dialécticamente sin cesar. El avance del conocimiento hace que se multipliquen ininterrumpidamente las categorías, para caracterizar definidamente las nuevas manifestaciones de lo existente. A la vez, con esas nuevas determinaciones se enriquece el conocimiento de las relaciones de unos procesos con otros, dando como resultado una interconexión cada vez mayor entre las categorías y el consiguiente ensanche del sistema en amplitud y en profundidad. Las categorías surgen en el curso de la actividad científica y se determinan y desarrollan mediante el avance y la comprobación de los conocimientos. Una vez formuladas y verificadas, las categorías sirven como instrumentos para descubrir los nexos internos, la unidad y las relaciones fundamentales que existen entre los procesos. Por consiguiente, además de constituir la condensación de los conocimientos ya logrados, las categorías son un medio para la investigación de nuevos conocimientos.

El desarrollo de la ciencia plantea constantemente la necesidad de modificar las categorías ya establecidas y, llegado el caso, conduce a la sustitución de unas categorías por otras, cuando se pone al descubierto que las primeras solamente representaban aspectos limitados e insuficientes de propiedades objetivas que tienen mayor generalidad. En ciertos periodos, cuando se exploran científicamente nuevos niveles de la realidad, la modificación de las categorías se realiza con mayor rapidez. Pero en todos los periodos, aunque sea de un modo más lento, tenemos que el progreso del conocimiento va imponiendo gradualmente la necesidad de modificar las categorías, hasta que la acu-

mulación de esos cambios graduales es suficiente para producir, de manera indispensable, una transformación radical en ciertas categorías. Cuando eso sucede, la transformación de las categorías adquiere una forma espectacular y provoca una crisis que conmueve a la ciencia de que se trate en su totalidad. De esta manera se advierte claramente cómo la fluidez y la mutabilidad son peculiaridades distintivas de las categorías, puesto que cada una de ellas refleja un determinado aspecto de la existencia y su sistema representa al conjunto de la existencia en un cierto nivel. Entonces, las categorías se vinculan entre sí, se condicionan recíprocamente, se oponen unas a otras, se interpenetran, se truecan mutuamente y se transforman sin cesar, para reflejar a la existencia objetiva en su movimiento y en su integridad. Por lo tanto, cualquier formulación que se haga de las categorías será siempre transitoria, por más que su expresión adopte la forma de una invariancia relativa. En todo caso, es necesario tener en cuenta que, tarde o temprano, el avance de la ciencia acabará por imponer su transformación. Y esa conversión puede llegar a ser de tal manera profunda que, en algunas ocasiones, lo único que se conserva de las anteriores categorías es el nombre.

Ahora bien, al mismo tiempo que tenemos categorías peculiares de cada ciencia, también existen otras categorías que abarcan grupos de ciencias y otras más que se refieren al conocimiento científico entero, porque representan las propiedades de un sector más amplio de la realidad o de todos los procesos existentes. Debido a esto, en cada ciencia quedan implicadas simultáneamente sus categorías exclusivas y las categorías más generales del conocimiento científico. Sin embargo, esta aplicación universal de las categorías del conocimiento en su conjunto, no significa que en cada uno de los dominios particulares en los cuales se aplican tengan exactamente el mismo carácter. En realidad, las categorías generales adoptan ciertas formas peculiares cuando son consideradas dentro de un dominio particularizado. Así, por ejemplo, la categoría de espacio es diferente en cierto modo, dentro del dominio de las cien-

cias sociales que con respecto al campo de las ciencias naturales. Y en el dominio de estas últimas, el espacio adopta distintas especificaciones en la geometría, en la física, en la química y en la biología. Más aún, dentro de una misma disciplina, como la física, la consideración del espacio presenta variaciones notables de una a otra de sus ramas componentes. En consecuencia, cada una de las divisiones de la ciencia posee sus categorías distintivas y éstas, conjuntamente con las categorías generales especificadas peculiarmente dentro de su dominio, la definen por completo. Pero, al propio tiempo, las categorías generales se determinan en el desarrollo de las investigaciones específicas de cada ciencia y de todas sus ramas y, por lo tanto, su determinación general se encuentra condicionada por las caracterizaciones particulares que va adquiriendo en los distintos dominios del conocimiento científico.

2. *Situación actual de las teorías físicas*

La física clásica, a la vez pre-cuántica y pre-relativista, llegó a establecer progresivamente una representación de la realidad, que se puede resumir en las siguientes nociones fundamentales. Desde luego, se admite explícitamente la existencia del universo de manera independiente a los observadores. El espacio-tiempo euclidiano es considerado como una especie de marco general en el cual se desarrollan los procesos y en cuyo seno se encuentran inmersos. El universo mismo es concebido como un conjunto infinito de partículas materiales en movimiento, cuyas dimensiones son tan pequeñas que pueden ser tratadas como puntos físicos. Las aceleraciones que experimentan dichas partículas materiales son atribuidas a los campos de fuerzas, los cuales hacen posible la descripción de su comportamiento objetivo. Las leyes que gobiernan la evolución de los procesos son de dos clases, unas se refieren al movimiento de las partículas sometidas a la acción del campo de fuerza, y las otras condicionan el movimiento de

los cuerpos o sistemas de partículas materiales dentro de los campos considerados. Como ejemplo de una ley del primer tipo, tenemos la de la gravitación universal de Newton; y, como ilustración de las leyes del segundo tipo, tenemos la de la inercia, la de la medición dinámica de la fuerza y la de la igualdad entre la acción y la reacción, o sea, las tres leyes newtonianas del movimiento. La concepción clásica entera es fundamental e irreductiblemente determinista, de tal manera que, en principio, es suficiente con conocer las condiciones iniciales —es decir, las posiciones y velocidades de las partículas materiales, dentro de un campo de fuerza y en un instante determinado— para poder calcular con todo rigor la evolución ulterior de cualquier proceso o sistema de procesos.

Es indudable que la física clásica representa una etapa sumamente importante del conocimiento científico, como parte del empeño humano por comprender y dominar a la naturaleza. Pero, como sucede a toda teoría científica, la física clásica acabó por tropezar con limitaciones insuperables y contradicciones graves, tanto en el dominio experimental como en el terreno lógico. En primer lugar, la noción misma del campo de fuerzas resultó ser algo inexplicable y extraño dentro del esquema clásico. En particular, la separación establecida entre el marco espacio-temporal y el campo de fuerzas, hace surgir indefectiblemente el problema de la acción a distancia y la acción instantánea. A este respecto, todos los intentos que se hicieron para introducir medios continuos, así fuesen ficticios, capaces de transmitir las acciones por contigüidad, fracasaron por completo. La última tentativa, realizada en 1887 por Michelson y Morley,[1] puso claramente al descubierto su imposibilidad y sirvió después como punto de partida para la formulación de la teoría de la relatividad. Por otra parte, dentro del esquema clásico es imposible explicar la interacción entre los campos de fuerza y las partículas materiales y, por ende, resultan incomprensibles las leyes del

[1] A. A. Michelson y E. W. Morley, *Silliman's Journal*, 3. S., *34*, 1887, p. 333.

movimiento. Como resultado de ello, se agudizó la inconsecuencia de considerar a las partículas materiales como si estuvieran inmersas en un espacio vacío y distinto de ellas. Por último, el esquema clásico vino a ser demasiado estrecho para explicar los cambios cualitativos que transforman la energía radiante en masa, los intercambios de energía entre los campos y las partículas y, en general, la interacción universal de los procesos en todas sus modalidades. Estas insuficiencias pusieron de manifiesto la imposibilidad de explicar las experiencias macrocósmicas y microcósmicas con base en el esquema clásico, a la vez que destacaron todavía más las contradicciones que se habían venido acumulando dentro de su propio dominio. En esas condiciones se inició la crisis de la física clásica, produciéndose una transformación radical de los fundamentos de la física en los dos extremos de la experiencia: en los procesos astronómicos y en los procesos atómicos.

Para superar las dificultades anteriores en el nivel de los procesos macrocósmicos, la teoría de la relatividad[2] fundió en una sola noción las dos concepciones de la realidad que se tenían como separadas: el espacio-tiempo y el campo de fuerzas. Manteniendo la consideración de la realidad del mundo exterior independiente de los observadores, la teoría de la relatividad introdujo el espacio-tiempo no-euclidiano, que se encuentra determinado por las propiedades de los procesos que lo constituyen, de tal manera que desempeña la función del campo clásico de gravitación. Este campo relativista ya no es un medio continuo en el espacio-tiempo exterior, sino que se confunde con el propio espacio-tiempo y ambos quedan descritos por la misma disciplina matemática, la geometría de Rie-

[2] Sobre la teoría de la relatividad restringida, el trabajo inicial de Albert Einstein es: "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", *Annalen der Physik*, ser. 4, *17*, 1905, pp. 891-921. Acerca de la teoría de la relatividad generalizada, la primera exposición completa del propio Einstein es: "Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie", *Annalen der Physik*, ser. 4, *49*, 1916, pp. 769-822. Ambos trabajos se encuentran traducidos al inglés en: A. Einstein, H. A. Lorentz, H. Weyl y H. Minkowski, *The principle of relativity*, Londres, Methuen, 1923.

mann. Como es fácil advertir, en el espacio-tiempo relativista se suprimen de modo manifiesto las acciones a distancia y las acciones instantáneas. La materia, por su parte, está representada por una sustancia única del género espacio-tiempo, cuya manifestación continua constituye el campo en el cual se presentan ciertas singularidades o discontinuidades, que son las partículas. Pero, en rigor, el campo y las partículas son simplemente aspectos diferentes o modos distintos de existencia de la materia en movimiento. La evolución de los procesos se puede representar entonces dentro de un marco espacio-temporal de cuatro dimensiones. Por otra parte, también se disolvió la dualidad clásica, que parecía irreductible, entre las leyes del campo y las leyes del movimiento. En fin, el esquema de la relatividad es determinista y permite la descripción simultánea de los campos y de las trayectorias de sus singularidades o partículas. Por lo tanto, al quedar fijadas las condiciones iniciales, se puede seguir rigurosamente la evolución de los procesos.

Ahora bien, la física clásica sigue siendo una teoría científicamente verdadera, porque explica los procesos mesocósmicos ya experimentados, lo mismo que los otros procesos pertenecientes a ese nivel de la existencia, aunque todavía no hayan sido experimentados. Como la verdad de la teoría clásica fue conquistada por medio de la comprobación experimental,[3] ella no ha sufrido menoscabo alguno por el hecho de que se hayan descubierto otros procesos físicos en los cuales no se cumplen las relaciones establecidas por la teoría, ya que dichos procesos pertenecen a otros niveles de la existencia. En todo caso, lo que se planteó fue la necesidad de formular una nueva teoría que estableciera una explicación única, tanto para los procesos mesocósmicos como para los macrocósmicos. Pero la

[3] Y todavía sigue siendo conquistada de la misma manera en nuestros días. Así, por ejemplo, el primer experimento de la física clásica en el dominio astronómico, no se realizó en rigor hasta el 4 de octubre de 1957, cuando los científicos soviéticos lograron colocar en órbita el primer satélite artificial de la Tierra.

física clásica sigue teniendo la misma veracidad y se cumple con igual necesidad, dentro del dominio para el cual fue establecida y comprobada; y lo único que se ha alterado es la universalidad que antes se le atribuía, puesto que se han descubierto los límites de su cumplimiento. Lo que es más, la teoría de la relatividad no sólo explica conjuntamente los procesos mesocósmicos y los macrocósmicos, sino que adopta la forma de la física clásica y se confunde con ella, cuando es aplicada al dominio de los procesos mesocósmicos. Por otra parte, en el nivel de los procesos microcósmicos también se han descubierto muchas propiedades que difieren notablemente de las existentes en los procesos mesocósmicos y en los macrocósmicos. Así surgió la necesidad de formular otra teoría explicativa, la mecánica cuántica, de cuyas características nos ocuparemos después. Por de pronto debemos señalar que, respecto a la física cuántica, la situación de la física clásica es enteramente análoga a la que guarda con respecto a la física relativista.

Como consecuencia de lo anteriormente dicho, la física se encuentra dividida actualmente en tres grandes niveles. Por una parte está el nivel macrocósmico, correspondiente a las grandes masas, las energías enormes y las velocidades de la luz y cercanas a ella, en donde se cumple únicamente la física relativista. Por otro lado tenemos el nivel mesocósmico, correspondiente a los procesos de dimensiones comparables a las del hombre, en donde se cumplen simultáneamente la física relativista, la física clásica y la física cuántica. Por último se encuentra el nivel microcósmico, correspondiente a las masas diminutas de las partículas elementales, que tienen energías y velocidades sumamente grandes, en donde se cumple exclusivamente la física cuántica. No obstante los muchos esfuerzos que se han hecho, hasta ahora no ha sido posible superar los graves obstáculos que se presentan para poder incluir los procesos microcósmicos dentro de la explicación relativista; ni menos todavía ha sido posible explicar los procesos macrocósmicos por medio de una teoría cuántica. Por lo tanto, lejos de existir una teoría general única, que explicara

satisfactoriamente el comportamiento de los procesos en todos los niveles, lo que sucede en el dominio de la física es que coexisten tres teorías diferentes. La teoría relativista tiene su dominio exclusivo y además coincide con la cuántica y la clásica en el nivel mesocósmico. De manera análoga, la teoría cuántica posee también su dominio propio y coincide con la relativista y la clásica en el nivel de los procesos de dimensiones medianas. Mientras que la teoría clásica comparte su dominio con las otras dos y, simultáneamente, representa un caso particular de ambas.

3. *Problemas de la teoría cuántica*

La necesidad de pasar de la física clásica a la mecánica cuántica, para explicar los procesos microcósmicos, fue tan imperiosa y objetiva como la que obligó a superar la propia física clásica en el otro sentido, con el establecimiento de la teoría de la relatividad, para poder explicar los procesos macrocósmicos. En ambos casos extremos de la experiencia, dicha necesidad quedó señalada por el descubrimiento de valores críticos, antes insospechados, para sendas propiedades físicas fundamentales. En el caso de la teoría de la relatividad, la propiedad destacada por Einstein es la *velocidad* y su valor crítico es c, la velocidad de la luz, o sea, con mayor generalidad, la velocidad de la energía radiante. En la física cuántica, la propiedad singularizada es el *cambio en la acción*[4] y su valor crítico es h, el *cuanto* descubierto por Planck.[5] De esa manera, la física relativista redujo la velocidad de lo infinitamente grande a un máximo sumamente grande, pero finito.[6] Por su parte, la teoría cuántica restringió los cambios en la acción de lo infinitamente pequeño a un mínimo pequeño en sumo grado, pero finito también.[7] El descubrimiento de esta dosis mí-

[4] La acción se define físicamente como el producto dimensional de la energía por el tiempo.

[5] Max Planck, *Verhandl. d. Deutsch. physikal Gesellschaft*, 2, 1900, p. 237.

[6] La magnitud de la velocidad de la luz, c, es: 2.99776×10^{10} cm/seg.

[7] El valor de la constante h de Planck, es: 6.6237×10^{-27} erg · seg.

nima indivisa representada por el cuanto, significa que no se puede producir ningún cambio en la acción que sea inferior a ese valor crítico y que, por otra parte, cualquier cambio que se produzca tendrá que ser un múltiplo entero de esa magnitud mínima. Además, esta discontinuidad no es privativa de los cambios en la acción, sino que también ha sido descubierta después en otras propiedades fundamentales de los procesos microcósmicos.

Tomando como base la discontinuidad manifiesta en el cuanto, la mecánica cuántica ha permitido generalizar las explicaciones de una multitud de resultados experimentales, con lo cual se han hecho comprensibles numerosos procesos físicos que no lo son conforme a las leyes clásicas y, también, ha abierto la posibilidad de anticipar racionalmente el descubrimiento de procesos nuevos. Al propio tiempo, de acuerdo con la teoría cuántica, se han formulado muchas leyes importantes acerca del comportamiento de las partículas elementales y se ha podido establecer el fundamento científico de un gran número de realizaciones técnicas verdaderamente sorprendentes. En particular, ha permitido el aprovechamiento de la energía nuclear, con la cual se ha inaugurado una nueva etapa en el desarrollo histórico del dominio humano sobre la naturaleza, que ofrece perspectivas enormemente promisorias en sus usos pacíficos. Sin embargo, después de un periodo de intensa investigación teórica sobre los procesos microcósmicos, durante el cual se descubrieron varias de las leyes que rigen su comportamiento y se pudieron formular los nuevos conceptos correspondientes, la mecánica cuántica ha pasado por una etapa exclusivamente experimental, en la que no se hizo nada esencialmente nuevo respecto al examen de los principios que le sirven de fundamento. Por el contrario, dichos principios fueron considerados como dogmas absolutos de una especie de "ortodoxia cuántica" tenida por intocable. Por fortuna, actualmente existe una corriente, cada vez más poderosa, que persigue el propósito de superar las inconsecuencias y oscuridades de esa "ortodoxia". En tal empeño confluyen ahora los trabajos de muchos

físicos eminentes, coincidiendo con los esfuerzos anteriores de Einstein, Planck, Lorentz, Langevin y Schroedinger, quienes nunca aceptaron a la mecánica cuántica como una teoría física completa, ni mucho menos como definitiva.[8] A la vez, se ha avanzado extraordinariamente en la investigación del interior del núcleo atómico y de las transmutaciones de las partículas elementales, descubriéndose así muchísimos hechos nuevos que hacen cada día más endeble la estructura lógica de la mecánica cuántica "ortodoxa". Es claro que todavía no se puede decir que se hayan resuelto íntegramente las dificultades que presenta el tratar de obtener una consecuencia racional rigurosa y la respectiva comprobación experimental para alguna de las nuevas teorías propuestas. Tampoco se puede desechar la posibilidad de que todas las tentativas ahora en curso terminen en el fracaso. Pero es igualmente indudable que con esas reinterpretaciones se tiene la posibilidad de llegar a resultados nuevos y fructuosos. En todo caso, lo que si ya es

[8] A este respecto pueden verse, entre otros, los siguientes trabajos: *Albert Einstein: Philosopher-Scientist,* Ed. P. A. Schilpp, Evanston, Ill., The Library of Living Philosophers, 1949; E. Schroedinger, "Are there quantum jumps?", *The British Journal for the Philosophy of Science, 3,* 1952, pp. 109-123 y 233-242; *Questions scientifiques, physique,* París, Les Editions de la Nouvelle Critique, 1952; L. Janossy, "The physical aspects of the wave-particle problem", *Acta Physica Hungarica,* 1, 1952, pp. 423-467; Albert Einstein, *The meaning of relativity,* Princeton, Princeton University Press, 1953; Louis de Broglie y Jean Pierre Vigier, *La physique quantique restera-t-elle indeterministe?,* París, Gauthier-Villars, 1953; J. P. Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta,* París, Gauthier-Villars, 1956; L. de Broglie, *El problema de la interpretación causal y objetiva de la física cuántica,* México, U.N.A.M., Suplementos del Seminario de Problemas Científicos y Filosóficos, Primera serie, Núm. 4, 1956; L. de Broglie, *Nouvelles perspectives en microphysique,* París, Albin Michel, 1956; *Physique, quelques problèmes philosophiques,* París, Les Editions de la Nouvelle Critique, 1957; M. E. Omelianovski y G. F. Drukarev, *Las relaciones de incertidumbre en la mecánica cuántica,* México, U.N.A.M., Suplementos del Seminario de Problemas Científicos y Filosóficos, Segunda serie, Núm. 6, 1958; David Bohm, *Causalidad y azar en la física moderna,* México U.N.A.M., 1959; M. E. Omelianovski, *Problemas filosóficos de la mecánica cuántica,* México, U.N.A.M., 1961; L. de Broglie y V. A. Fok, *Examen de la mecánica cuántica,* México, U.N.A.M., Suplementos del Seminario de Problemas Científicos y Filosóficos, Segunda Serie, Núm. 29, 1961; Albert Einstein, *La relatividad,* México, Editorial Grijalbo, 1970.

imposible es el seguir sosteniendo la teoría cuántica "ortodoxa". Y, últimamente, aún cuando fracasen todas las actuales tentativas, acabará por encontrarse la teoría acertada que se requiere.

La teoría cuántica "ortodoxa" tiene tres presentaciones: el método de las matrices de Heisenberg,[9] la mecánica ondulatoria de De Broglie[10] y Schroedinger,[11] y la mecánica cuántica relativista de Dirac.[12] Pero, a pesar de sus aparentes divergencias, esas tres presentaciones no se encuentran en conflicto. Por el contrario, son matemáticamente equivalentes y sólo difieren en la disposición conceptual de que están revestidas, con lo cual ofrecen ciertas ventajas o desventajas para abordar algunos problemas. Además, los tres métodos conducen a los mismos resultados acertados y también llevan a absurdos semejantes. En realidad, las tres interpretaciones constituyen refinamientos de la mecánica cuántica primitiva y, como se pueden utilizar indistintamente, forman lo que se llama la teoría cuántica "ortodoxa". Sus nociones primarias se han construido como concepciones híbridas, tomando las partículas materiales de la física clásica, ajustadas convenientemente o desconcertadas por los postulados cuánticos, para insertarlas en un aparato matemático complicado que se ha matizado principalmente por consideraciones estadísticas, aunque de un tipo diferente a las que constituyen la estadística clásica. Pero, a pesar de todo, la teoría cuántica ha tropezado con serias dificultades internas, que indican seguramente faltas de consecuencia y de completividad en sus principios y en sus desarrollos; lo cual significa que la estructura lógica de la teoría es imperfecta y que sus conclusiones son insuficientes para explicar los resultados experimentales. Se puede decir, incluso, que el carácter "ortodoxo" de la teoría cuántica se ha hecho tan complejo y poco satisfactorio,

[9] W. Heisenberg, *Zeitschr. f. Physik, 33,* 1925, p. 879.

[10] L. de Broglie, *Ann. de Physique, 10,* 3, 1925, pp. 22-128.

[11] E. Schroedinger, *Annal d. Physik, 79,* 1926, pp. 361, 489, 734; *80,* 1926, p. 437; *81,* 1926, p. 109.

[12] P. A. M. Dirac, *Proc. Roy. Soc., 110,* 1926, p. 561.

como el que mostraba la mecánica clásica cuando se trataba de aplicarla inflexiblemente a la explicación de los procesos microcósmicos.[13]

Lo que sí se encuentra completamente esclarecido desde hace bastante tiempo por los descubrimientos experimentales, es el hecho de que la mecánica clásica es inaplicable al dominio de los procesos microcósmicos. Sin embargo, la teoría cuántica simplemente sigue planteando el problema de hallar explicación al comportamiento de las partículas elementales y destaca con urgencia la necesidad de preparar el terreno para arribar al establecimiento de nuevas concepciones físicas; sin que, por ello, pueda decirse que la propia teoría cuántica haya resuelto ya esas cuestiones fundamentales. Entonces, es imprescindible hacer la revisión rigurosa de los problemas pendientes de resolver, atacándolos en dos frentes: por un lado, acumulando y organizando el material experimental de los hechos que no se pueden explicar satisfactoriamente y, por otro, criticando las bases de los argumentos que han llevado a establecer la "ortodoxia" cuántica, que ahora se muestra tan insuficiente como la física clásica en el nivel microcósmico. El primer frente pertenece propiamente a los físicos experimentales, mientras que en el segundo es indispensable la colaboración y el esfuerzo común de los físicos teóricos y de los filósofos; solo que en ambos frentes se requiere de un modo ineludible la conjugación de la teoría y la práctica científicas. Desde luego, podemos afirmar que la nueva interpretación tendrá que ser coherente en su estructura interna y deberá incluir todos los conocimientos que ya se tienen sobre los procesos microcósmicos, iluminándolos con una comprensión cabal. Igualmente, tendrá que resolver todas las paradojas advertidas hasta ahora, haciendo que el nivel del microcosmos sea inteligible con entera congruencia y resulte plenamente manejable con base en un fundamento racional y objetivo. Tendrá que abarcar

[13] Una exposición extensa de estos problemas puede verse en J. P. Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta.*

la explicación del desarrollo, el origen, las interacciones y las transformaciones de las partículas elementales.[14] Y, sobre todo, la nueva interpretación teórica tendrá que permitir la anticipación de otros hechos y hacer posible su verificación experimental.

4. *Necesidad de establecer nuevas categorías*

Como ya lo decíamos antes, Einstein, Planck y Langevin tuvieron siempre a la mecánica cuántica por una teoría incompleta y consideraron que la introducción de los nuevos conceptos indispensables para integrarla permitiría, entre otras cosas, demostrar que en el comportamiento de las partículas elementales también se cumple el determinismo. Esa consideración implica que nuestra actual incapacidad para explicar los procesos microcósmicos se debe al empleo extralógico de las categorías clásicas, que fueron formuladas a partir de nuestros conocimientos experimentales de los procesos mesocósmicos y que han sido transladadas al nivel microcósmico, sin someterlas propiamente a crítica ni modificación algunas, para utilizarlas como elementos de su descripción científica. Por ende, una parte de la solución parece encontrarse obviamente en la transformación de las categorías de espacio, tiempo, movimiento, masa, energía y causalidad; interpretando para ello, con fruto y rigor, los hechos conocidos experimentalmente sobre las partículas elementales. En realidad, las previsiones que se pueden derivar de una teoría, están restringidas por las categorías que la propia teoría acepta como válidas. Entonces, cuando las categorías de una teoría son defi-

[14] Las partículas elementales conocidas hasta ahora son los fotones, los leptones y los bariones. Los fotones son de un sólo tipo. Los leptones incluyen: el electrón, el muón, la partícula tau, los tres neutrinos correspondientes y las respectivas antipartículas. Los mesones son: el pión, el kaón, las partículas eta, phi y psi, los mesones encantados y sus antipartículas correspondientes. Los bariones son: los nucleones (el protón y el nuetrón) y los hiperones (las partículas delta, lambda, sigma, xi, omega y lambda encantada), con sus respectivas antipartículas. Algunas partículas tienen carga eléctrica positiva o negativa, y otras son neutras.

cientes, la teoría puede llegar a convertirse hasta en un obstáculo para prever con precisión ciertos acontecimientos, aún cuando dichos acontecimientos sean enteramente reales y no obstante que ocurran de un modo perfectamente determinado. Cuando sucede esto, se considera a la teoría en cuestión como incompleta.[15] Tal es el caso en que se encuentran las teorías cuánticas "ortodoxas", puesto que limitan su campo de estudio a los procesos colectivos formados por conjuntos enormes de partículas elementales, sin que puedan ofrecer explicaciones satisfactorias acerca de los procesos en que intervienen partículas elementales por separado o grupos pequeños de ellas. Por lo tanto, es posible que la vaguedad de la mecánica cuántica, puesta agudamente en evidencia por las relaciones de incertidumbre, se deba simplemente a que la teoría es incompleta. Con todo, es necesario advertir que, en rigor, es imposible construir una teoría que fuese enteramente completa, ya que eso sería tanto como pretender que su dominio representara totalmente al universo, sin límite alguno. Lo que es más, aún suponiendo que hubiera la posibilidad de formular una teoría completa, de acuerdo con todos los conocimientos adquiridos hasta un momento dado, no obstante dicha teoría se mostraría más adelante como incompleta, cuando se descubrieran otros aspectos del universo que excedieran el dominio acotado por la teoría en cuestión, mismos que ni siquiera se sospecharían con arreglo a dicha teoría. Por consiguiente, lo que se debe plantear es la formulación de una teoría cuántica que sea lo suficientemente completa como para ofrecer una explicación racional y objetiva de todos los conocimientos logrados sobre los procesos microcósmicos. Y, cuando se consiga es-

[15] Así, por ejemplo, la termodinámica es una teoría incompleta, porque limita su dominio a las categorías y propiedades mesocósmicas de los movimientos moleculares, sin poder suministrar información sobre los procesos microcósmicos que los determinan. En cambio, en la teoría cinética, los conceptos mesocósmicos de la termodinámica —tales como la temperatura, la presión y la entropia— son sustituidos por los conceptos mecánicos aplicables a los procesos individuales, para poder dar cuenta y razón de ellos.

tructurar tal teoría, se tendrá a la vez una explicación estricta para una multitud de hechos que se descubrirán en el futuro. Ya que, como lo demuestra reiteradamente la historia de la ciencia, toda generalización científica bien fundada en los experimentos, supera con mucho la extensión y la profundidad de sus cimientos.

Según parece, ni los conceptos mecánicos clásicos ni las categorías de campo, tal como están formulados, pueden servir para superar la teoría cuántica actual. Es necesario establecer categorías radicalmente nuevas, que seguramente diferirán en muchos aspectos de las conocidas hasta ahora. Además, se ha hecho demasiado flúida la aplicación de las nociones empleadas "cuánticamente". Por ello, es menester encontrar una definición suficientemente neta de los conceptos que se emplean y, en particular, de las categorías; sin olvidar que, por de pronto, se tratará de nociones extrañas al llamado "sentido común", que tendrán un carácter hipotético mientras no puedan ser verificadas satisfactoriamente en los experimentos. Por otra parte, es preciso tener en cuenta que, a pesar de todos los éxitos sorprendentes de la física cuántica, su significado objetivo no ha podido ser esclarecido tan profundamente como se ha hecho, en cambio, con las nuevas categorías surgidas en la teoría de la relatividad. En consecuencia, es indispensable examinar con claridad la mecánica cuántica y poner al descubierto explícitamente todas las nociones contenidas en ella, para someterlas luego a una crítica rigurosa y poder planear así la construcción lógica de las nuevas categorías requeridas. Para conseguirlo, se debe practicar un análisis filosófico penetrante de la teoría cuántica actual y de los conocimientos adquiridos acerca de las partículas elementales. Y, por lo demás, ante las pruebas tan convincentes aportadas por los resultados experimentales, es necesario aprender a servirse de las nuevas posibilidades dialécticas de pensar que la misma naturaleza nos procura, justamente, a través de la reflexión racional de las propiedades cuánticas puestas de manifiesto en los procesos microcósmicos.

Desde luego, está enteramente en claro que la formulación de las nuevas categorías cuánticas no puede consistir en la simple yuxtaposición de dos o más categorías clásicas, para considerarlas entonces en su simple reunión. Tal manera de proceder es la que ha conducido a la mecánica cuántica ante dificultades tremendas; como las que resultan, por ejemplo, del empeño de sostener simultáneamente los conceptos clásicos de onda y de corpúsculo, como aspectos mutuamente excluyentes de las partículas elementales.[16] También se encuentra obviamente aclarado que las contradicciones suscitadas por esas uniones formales de conceptos clásicos, son completamente superables. Su solución tiene que buscarse por el camino de establecer su síntesis dialéctica, con base en la interpenetración y la unidad de los opuestos, para explicar de manera racional y objetiva los resultados experimentales. De esa manera es como podrá conseguirse la formulación de categorías en las que, no obstante su complejidad, sus diversos elementos estén vinculados tan estrecha y orgánicamente, como las distintas partes de un todo. Por lo tanto, habrá necesidad de transformar dialécticamente algunas categorías clásicas, de abandonar otras y de establecer también nuevas categorías, para hacer posible la formulación de una teoría física de los procesos microcósmicos que corresponda efectivamente a la realidad y sirva como instrumento para planear muchos descubrimientos de nuevas propiedades y de otros procesos.

El pasado inmediato de la ciencia física nos enseña algunos de los posibles caminos a seguir. Uno de ellos es el utilizado en la teoría de la relatividad. Como es sabido, anteriormente el campo eléctrico y el campo magnético eran considerados por separado y tratados de distinta manera. Pues bien, la teoría de la relatividad fundió ambos campos en uno solo, para introducir el continuo espacio-

[16] Tanto la representación literalmente corpuscular de las partículas elementales, a la manera clásica, como su representación latamente ondulatoria, también al modo clásico, muestran claramente su carencia de validez a través de las relaciones de incertidumbre.

tiempo tetradimensional, dentro del cual está situado el tensor electromagnético de cuatro dimensiones. Tal vez será indispensable hacer algo análogo para resolver dialécticamente los antagonismos que se plantean agudamente en la mecánica cuántica entre las dualidades constituidas por la onda y el corpúsculo, la continuidad y la discontinuidad, el espacio y la cantidad de movimiento, la energía y el tiempo, el espacio y el tiempo, la energía y el espacio, el tiempo y la cantidad de movimiento, y la energía y la cantidad de movimiento. Otra alternativa consiste en intensificar la exploración de las posibilidades que ofrece la formulación rigurosa de la teoría cuántica del campo,[17] porque en ella las partículas elementales son consideradas como cuantos de su campo correspondiente, o sea, como singularidades de un medio continuo al cual se encuentran ligadas indisolublemente. Por lo tanto, en dicha teoría no es necesario introducir las hipótesis del corpúsculo clásico o de la onda clásica, ni siquiera a título complementario.

Otra alternativa más la tenemos en el procedimiento seguido para formular las cuatro interpretaciones que se han hecho del dualismo entre la onda y el corpúsculo, manifiesto en las partículas elementales. En la primera, que es la hipótesis de la onda piloto de De Broglie,[18] se considera que el corpúsculo tiene realidad objetiva y la onda viene a ser una mera abstracción que guía su movimiento. En la segunda hipótesis, debida a Schroedinger,[19] se sostiene la existencia de las ondas, de manera análoga a su concepción clásica, teniendo a las manifestaciones corpusculares como simples apariencias. En la tercera, que es la hipótesis de Bohr,[20] se desprende en último término que la onda y el corpúsculo son considerados como simples apariencias complementarias carentes de realidad física alguna. Y en la cuarta, que es la hipótesis de la doble

[17] A. Sokolov y D. Ivanenko, *Kvantovaia Teoria Polia*, Moscú-Leningrado, Gosudarstvennoe Izdatelstvo, 1952.

[18] L. de Broglie, *Électrons et photons*, París, Gauthier-Villars, 1928.

[19] E. Schroedinger, *Abhandlungen zur Wellenmechanik*, Leipzig, 1928.

[20] N. Bohr, *La théorie atomique et la description des phénomènes*, París, Gauthier-Villars, 1932.

solución de De Broglie,[21] se considera que tanto la onda como el corpúsculo tienen realidad objetiva, de tal modo que el corpúsculo constituye una singularidad en el seno de un proceso ondulatorio amplio. En caso de adoptar este procedimiento, después de examinar estrictamente todos los tipos de solución, habría que empeñarse en desenvolver aquella que resultara estar más de acuerdo con las exigencias científicas de encontrar una explicación racional y objetiva de la realidad. Siguiendo la ilustración anterior, tendríamos el proyecto de llegar a fundamentar el establecimiento de un juicio de reciprocidad,[22] en el cual se sintetizaran dialécticamente la noción de onda y la de corpúsculo. De esa manera formularíamos un dilema, cuyas dos alternativas serían: que las partículas elementales sean corpusculares y ondulatorias a la vez, o bien, que no sean corpusculares ni ondulatorias y, por ende, no sean partículas elementales. Tal juicio de reciprocidad se podría enunciar elementalmente así: Todo corpúsculo se mueve ondulatoriamente, y todo movimiento ondulatorio corresponde a un corpúsculo. Por supuesto, para culminar este procedimiento habría que estudiar luego todas las posibilidades de generalización y de análisis objetivo de cada una de las dualidades contradictorias formuladas.

Una vez que se logre establecer la nueva construcción conceptual, tendrá que venir la prueba decisiva de la objetividad. Las nuevas categorías tendrán que explicar los hechos de los cuales surgieron las contradicciones, que son insostenibles para las viejas categorías. A la vez, las nuevas categorías deberán sugerir otros efectos experimentales posibles y, en general, abrir un campo mayor para las investigaciones ulteriores. Entonces se cerrará un ciclo del conocimiento científico, ya que del mismo modo en que de los experimentos realizados surgió la

[21] L. de Broglie, "La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement", *J. Phys. Rad.*, ser. 6, *8*, 5, 1927, pp. 225-241.

[22] Sobre este tipo de juicio, véase: Eli de Gortari, *Introducción a la lógica dialéctica*, México, Fondo de Cultura Económica, sexta edición, 1976, pp. 153-156, 169-170, 173 y 175.

necesidad de establecer una nueva explicación teórica, así también, de la formulación teórica de las nuevas categorías surgirá la necesidad de establecer su verificación experimental. Por otro lado, tenemos que las nuevas categorías tendrán que ser expresadas en forma relativamente flexible, para que puedan ser aplicadas fructuosamente a la realidad y para que ofrezcan constantemente la susceptibilidad de sufrir las modificaciones que se hagan necesarias.[23] Hay que tener presente que la realidad acaba siempre por desbordar los marcos construidos por nuestra razón. Por ello, tenemos que estar siempre atentos a las divergencias que se susciten entre la realidad objetiva y nuestra concepción racional. Tales divergencias son ineludibles, debido al hecho de que la realidad es infinitamente compleja, se matiza indefinidamente y se encuentra en continua transformación; mientras que nuestra razón construye conceptos más o menos rígidos, más o menos esquemáticos y siempre incompletos. En fin, las nuevas categorías serán susceptibles de aplicarse a la realidad en la medida en que la reflejen de manera definida y en cuanto se verifique su correspondencia con ella. Pero nunca podremos esperar que esa correspondencia se mantenga invariablemente o en definitiva. Porque la realidad es demasiado flúida y de una riqueza tan inagotable, como para que jamás se pueda encerrar en el marco rígido y abstracto de nuestras representaciones categoriales y de los sistemas funcionales edificados con las categorías.

5. Correspondencia entre los niveles de la existencia

Como ya lo hemos expresado, la teoría de la relatividad se convierte en la física clásica, cuando las velocidades de los procesos son pequeñas en comparación con la velocidad

[23] Cuando un concepto cualquiera se precisa hasta el extremo y se postula como absoluto e inmutable, se convierte irremediablemente en una mera forma idealista, sin contenido real y sin extensión alguna, como ocurre, por ejemplo, con el concepto metafísico de "ser".

de la luz y, a la vez, sus otras magnitudes dejan de ser astronómicas y se reducen a dimensiones comparables con las humanas. Igualmente, la mecánica cuántica se transforma en la física clásica, cuando los cambios cuánticos en la acción son sumamente pequeños en relación con la acción total presente y, al propio tiempo, las otras dimensiones de los procesos se amplifican. Estas dos conversiones representan casos conspicuos del cumplimiento de la ley dialéctica de la transformación de la cantidad en cualidad.[24] Así, el cambio gradual en la magnitud de las dimensiones de los procesos, desde el nivel microcósmico hasta el de las magnitudes comparables con las humanas, produce la transformación brusca de las leyes cuánticas en las leyes clásicas. A su vez, el crecimiento continuo de la magnitud de las dimensiones de los procesos, hasta alcanzar el nivel astronómico, trae aparejada la conversión súbita de las leyes clásicas en las leyes relativistas. Y lo mismo sucede inversamente cuando el cambio cuantitativo de las dimensiones se realiza en sentido opuesto. Este hecho, conocido con el nombre de principio de correspondencia,[25] nos muestra con claridad cómo las teorías científicas que han sido comprobadas ampliamente en los experimentos, no sufren después ningún detrimento en su validez, cuando se descubren procesos nuevos que ya no pueden ser explicados por ellas por encontrarse fuera de su alcance. En tal caso, lo que sucede sencillamente es que se descubren las fronteras de dichas teorías y se determina con precisión su dominio limitado, dentro del cual siguen siendo plenamente válidas.

De acuerdo con los conocimientos actuales, la existencia objetiva tiene varios niveles. El nivel más profundo es el constituido por la estructura interna de las partículas consideradas hasta hace poco como elementales, que están formadas por los *quarks*, cuyas características se están determinando

[24] La caracterización de esta ley puede verse en De Gortari, *Introducción a la lógica dialéctica*, pp. 59-64.

[25] L. de Broglie, *Le principe de correspondence et les interactions entre la matière et le rayonnement*, París, Hermann et Cie., 1938.

ahora. Luego viene el nivel formado por dichas partículas en estado libre, es decir, cuando no se encuentran integrando una estructura. En seguida tenemos el nivel nuclear, que es la estructura primordial formada por las partículas elementales y en donde ocurren procesos con energías elevadísimas y distancias sumamente pequeñas. Después vienen los procesos atómicos de distintas clases, de los cuales forman parte los núcleos como partículas indivisas, que abarcan energías menos elevadas y distancias mayores. Luego tenemos los procesos químicos, que comprenden las reacciones entre los átomos, para integrar y desintegrar las moléculas. A continuación tenemos los movimientos y transferencias de energía que se producen entre las moléculas, constituyendo el nivel termodinámico. Después vienen los procesos mesocósmicos de dimensiones semejantes a las del hombre, que son estudiados por la física clásica. Finalmente se encuentran los procesos en que intervienen energías y masas elevadísimas conjugadas con distancias astronómicas, cuyas leyes son tratadas en la física relativista. En otro sentido, desprendiéndose también del nivel molecular, se hallan los procesos biológicos que se producen a partir de ciertas síntesis químicas muy complejas. Y después tenemos, en ese mismo sentido, los procesos sociales que se inician en una etapa elevada de la organización biológica, con la evolución histórica del hombre.

Pues bien, con excepción del nivel biológico y del social, los otros niveles de la existencia constituyen otros tantos dominios de las ciencias físicas. Por lo tanto, la correspondencia entre las teorías científicas respectivas plantea la exigencia de que, en los casos limitantes, las propiedades correspondientes a un nivel se conviertan completamente en las propiedades del nivel colindante. De esa manera, las leyes que gobiernan los procesos internos de las partículas elementales se transforman en las leyes que rigen a las propias partículas elementales; a su vez, estas últimas se convierten en las leyes nucleares; mismas que se transmutan después en las leyes atómicas; luego se trans-

forman en leyes químicas; en seguida se convierten en leyes termodinámicas; a continuación se cambian en las leyes de la física clásica; y, por último, se tornan en las leyes de la física relativista. Y, del mismo modo como esa transición simultáneamente gradual y brusca se produce en el sentido que acabamos de indicar; igualmente existe una transición continua y discreta a la vez entre las leyes de la física, pasando de un nivel a otro en el sentido opuesto. Más aún, incluso existen ciertas leyes clásicas que son invariantes respecto a la transformación de la física clásica en física relativista o, bien, de su conversión en mecánica cuántica. En fin, existen también algunas leyes que son enteramente válidas para explicar el comportamiento de los procesos físicos en cualquier nivel de la existencia, sin que sufran ninguna modificación. Entre esas leyes invariantes tenemos, como ejemplo destacado, el principio de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento, que se cumple inexorablemente en todos los niveles estudiados por la física.

En el análisis que vamos a emprender a continuación sobre las categorías fundamentales de la física, tendremos en cuenta la posibilidad de que las características que tienen los procesos en el dominio de las dimensiones medianas, que es estudiado por la física clásica, resulten ser expresiones aproximadas de las propiedades que poseen los procesos en otros niveles de la existencia y, en particular, en el dominio de la física cuántica. Asimismo, es posible que algunas cualidades de los procesos de dimensiones astronómicas, también se muestren como representaciones aproximadas de los rasgos característicos de los procesos atómicos, nucleares o de otros niveles más profundos. Más todavía, no deberá extrañarnos que, en algunos casos, el examen nos lleve a concluir la invariancia de ciertas propiedades mesocósmicas en el nivel microcósmico. Por supuesto, es casi inútil señalar que las propiedades conocidas objetivamente en el dominio mesocósmico, nos servirán fructuosamente como hipótesis para la exploración de los procesos en el dominio cuántico, hasta el momento en que

surja la necesidad de modificarlas, transformarlas o desecharlas, cuando así lo impongan los hechos. Es decir, que al tratar de construir las categorías fundamentales de los procesos microcósmicos, nos serviremos de la interpretación de lo desconocido en términos de lo conocido, pero sin aferrarnos incondicionalmente a lo conocido. Por consiguiente, estaremos siempre dispuestos a reconocer lo nuevo, por extraño que pueda parecernos, cuando surja como resultado de la interpretación dialéctica de los hechos experimentales. Por otro lado, tendremos que considerar finalmente que las categorías cuánticas se transformen estrictamente en las categorías clásicas, cuando los procesos atómicos se presenten en gran escala, o sea, en la escala de las dimensiones humanas. En esas condiciones quedará satisfecho el requisito científico de la correspondencia entre las categorías, en los distintos niveles de la existencia.

II

LA CATEGORÍA DE ESPACIO

6. Noción del espacio

El espacio es una propiedad común a todos los procesos existentes. La relación espacial es la forma elemental en que se expresa la concatenación entre cada proceso del universo y todos los demás. Esta misma vinculación permite advertir que el espacio no es algo independiente de los procesos, ni tampoco constituye una especie de recipiente en el cual estuviesen inmersos los procesos. Simplemente, el espacio es el conjunto de las propiedades espaciales que son inherentes a los procesos objetivos y representan una forma de su existencia. Por lo tanto, hablando con todo rigor, los procesos no existen en el espacio, sino que su existencia es espacial. Más aún, el carácter común que tienen las propiedades espaciales muestra, de una manera definida, la pertenencia inextinguible de cada proceso elemental a un sistema, lo mismo que la vinculación indisoluble entre ese sistema y los otros sistemas y, por consiguiente, la conexión existente entre todos y cada uno de los procesos del universo. Las propiedades conocidas de los procesos, en tanto que permanecen inalteradas, se consideran analógicamente como propiedades espaciales. En cambio, el surgimiento de nuevas cualidades o la manifestación de propiedades antes ignoradas en los procesos, son consideradas también por analogía como propiedades temporales. Así se dice que las cualidades surgen en el tiempo y se conservan en el espacio. De la misma manera, se tiene a la novedad de una cualidad, a su desemejanza, como perteneciente al tiempo; mientras que lo conservado de esa cualidad, su semejanza, se tiene como parte del espacio. En realidad, el espacio y el tiempo son aspectos del desarrollo del universo y, por consiguiente, son formas de su existencia. El tiempo es la

totalidad de las manifestaciones objetivas del universo en un orden único, común y fundamental para todos los procesos. En tanto que el espacio es ese mismo conjunto total de las manifestaciones de la existencia, solo que incluidas como elementos de una serie que presenta una multitud de ordenaciones coexistentes.

Las formas primordiales de toda existencia particular son el espacio y el tiempo; y una existencia concebida fuera del espacio es tan absurda como lo sería una existencia concebida fuera del tiempo. Por ello, la investigación científica avanza constantemente en el descubrimiento de las propiedades espaciales de los procesos existentes, enriqueciendo su determinación cognoscitiva y, por lo tanto, ampliando y profundizando su concepto. Y esta transformación continua del concepto científico del espacio no reduce en nada su objetividad sino que, por el contrario, la confirma reiteradamente y mejora su representación racional.[1] Es cierto que con la teoría de la relatividad se ha puesto en claro que el espacio y el tiempo no constituyen formas separadas e independientes de la existencia. Pero ese descubrimiento no afecta la objetividad del espacio-tiempo, sino que pone de manifiesto el carácter relativo de su variación. Lo que se ha derrumbado es la separación metafísica que se hacía entre el espacio y el tiempo, para concebirlos en su relación recíproca, en su condición conjugada e inseparable, en la interconexión dialéctica en que existen objetivamente. De igual manera, las nuevas propiedades espaciales y temporales descubiertas en el nivel microcósmico de la existencia, tampoco han menguado en nada la objetividad del tiempo y el espacio.

El espacio, como conjunto de las propiedades espaciales de los procesos existentes, es un conjunto único y continuo; pero, a la vez, es discontinuo, posee estructura atómica y es divisible infinitamente. Por otra parte, el espacio tiene tres dimensiones, ni una más ni una menos. Y estas

[1] El desarrollo histórico de las teorías físicas del espacio puede verse, por ejemplo, en M. Jammer, *Concepts of space,* Nueva York, Harper & Brothers, 1960; traducción al castellano, *Conceptos de espacio,* México, Editorial Grijalbo, 1970.

tres dimensiones del espacio son enteramente objetivas, puesto que toda determinación científica del universo las incluye ineludiblemente. En el continuo espacio-tiempo de cuatro dimensiones, se introduce el tiempo como una cuarta dimensión singular, en tanto que el espacio sigue siendo tridimensional. Otra propiedad del espacio es su conectividad, que se define como la proximidad infinita en que se encuentran todos los puntos espaciales. Esto quiere decir que en el entorno de un punto cualquiera del espacio, siempre existe un número infinito de puntos situados a una distancia menor que una longitud dada cualquiera, por pequeña que ésta sea.[2] La conectividad del espacio expresa su continuidad física, la cual se encuentra condicionada por los campos de fuerza existentes en el propio entorno en cuestión. Porque, como se ha comprobado experimentalmente, las propiedades espaciales están determinadas fundamentalmente por la distribución de las masas y las energías y, en consecuencia, por los efectos y las interacciones mutuas de los procesos que manifiestan esas propiedades espaciales. Por otra parte, tenemos que en el espacio se cumplen ciertas leyes de simetría, de las cuales las más simples son la homogeneidad y la isotropía. La homogeneidad del espacio significa que sus propiedades se conservan en todos los lugares sin excepción. La isotropía indica que las cualidades del espacio son las mismas en cualquier dirección que se considere. Entonces, debido al carácter isotrópico y homogéneo del espacio, resulta que la única manera de distinguir una región espacial de otra es, justamente, a base de su relación con las posiciones de los procesos existentes; y, por eso mismo, la posición de un proceso cualquiera solamente se puede determinar con respecto a otros procesos. Por otro lado, tenemos que el espacio es congruente, o sea, que es posible el desplazamiento espacial sin que se alteren las propiedades de los procesos transportados. En fin, hasta hace unos cuantos años, también se consideraba como una propiedad general del espa-

[2] Véase, G. A. Kursanov, "Espacio y tiempo, formas de existencia de la materia", *Dialéctica,* La Habana, *6,* 11, 1944, pp. 147-183.

cio a la invariancia ante la reflexión especular, que es otra ley de simetría. De acuerdo con ella, se señalaba que un proceso cualquiera presenta las mismas características espaciales que otro proceso formado a la inversa, o sea, como su imagen reflejada en un espejo, como sucede entre nuestra mano izquierda y nuestra mano derecha. Pero últimamente se ha comprobado que dicha invariancia no se cumple siempre en los procesos microcósmicos.[3] En consecuencia, nos encontramos ante la posibilidad de que exista una asimetría fundamental en el espacio, de la cual nos ocuparemos más adelante.

7. *La incertidumbre de la posición espacial*

Como es sabido, uno de los descubrimientos más sorprendentes hechos por la teoría de la relatividad, es el esclarecimiento de que la simultaneidad de dos o más acontecimientos ocurridos en diferentes lugares es enteramente problemática, debido a la velocidad finita con que se transmiten las señales. Análogamente, en el caso de los procesos microcósmicos, se ha puesto al descubierto cómo se vuelve impreciso el significado de la determinación simultánea de la posición definida y la cantidad de movimiento también definida de una partícula elemental. En efecto, para determinar la cantidad de movimiento de un átomo, es necesario realizar una medición precisa de la variación que experimenta durante la emisión de energía radiante. Al ejecutar esa medición, se encuentra que la cantidad de movimiento de la radiación emitida es igual y opuesta al cambio experimentado en la cantidad de movimiento del átomo. La energía radiante es emitida en la misma dirección de la reculada que sufre el átomo, pero en sentido contrario; y, por lo tanto, lo que se tiene es un haz de radiación. En cambio, cuando se ejecuta una medición exacta de la posición espacial ocupada por el átomo,

[3] Según se desprende del descubrimiento de Lee Tsung-dao y Yang Chen-ning, acerca del incumplimiento del principio de conservación de la paridad. Véase la Sección 14.

resulta que tanto la cantidad de movimiento como el cambio que se produce en su magnitud se hacen imprecisos. En particular, se vuelve también imprecisa la dirección en que es emitida la energía radiante, de tal manera que se realiza prácticamente en todas direcciones formando una onda esférica de radiación, en vez de un haz. De lo cual se infiere que la cantidad de movimiento y la posición de los fotones de la radiación no pueden ser medidas simultáneamente con exactitud. Y esta misma característica se tiene también en el caso de las otras partículas elementales, tal como ha quedado expresado por las relaciones de incertidumbre de Heisenberg.[4] De acuerdo con dichas relaciones, mientras más precisamente se determina la posición de una partícula elemental, más incierta resulta ser su cantidad de movimiento; y, recíprocamente, mientras más exactamente se determina la cantidad de movimiento de una partícula elemental, más incierta resulta ser su posición.[5]

Todavía, hablando con mayor exactitud, tenemos que mientras más precisamente se determina la posición de una partícula elemental, respecto a una de las dimensiones espaciales, más incierta resulta ser la determinación de la componente de la cantidad de movimiento en esa misma dimensión, y viceversa.[6] Sin embargo, es necesario advertir que es posible determinar la posición espacial de una partícula elemental en una dimensión, con el grado de exactitud que se quiera, sin que eso afecte la determinación de la propia posición o de las componentes de la cantidad de movimiento en las otras dos dimen-

[4] W. Heisenberg, "Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik", *Zeits. f. Physik, 43,* 1927, p. 172.

[5] Entre las incertidumbres Δx, Δy, Δz, de las coordenadas espaciales y las incertidumbres Δp_x, Δp_y, Δp_z, de las respectivas componentes de la cantidad de movimiento en las mismas direcciones, se cumplen las siguientes desigualdades:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi}, \qquad \Delta y \Delta p_y \geq \frac{h}{4\pi}, \qquad \Delta z \Delta p_z \geq \frac{h}{4\pi}.$$

[6] La componente del vector cantidad de movimiento en una dirección, es el vector formado por su proyección en esa dirección.

siones. De un modo análogo, la determinación precisa de la componente de la cantidad de movimiento en una dimensión, no perturba a la determinación de las componentes de la cantidad de movimiento o de las coordenadas espaciales en las otras dos dimensiones. Por lo tanto, de acuerdo con las mismas relaciones de incertidumbre, cuando se determina la posición de una partícula elemental con toda la precisión requerida, esa determinación no perturba a dicha posición y, por consiguiente, al medir inmediatamente después la posición de la partícula nuevamente, no la encontraremos afectada por la medición anterior. Lo que sí habrá cambiado con la determinación de la posición es la cantidad de movimiento de la partícula. Y lo mismo sucede con respecto a la cantidad de movimiento, que no se altera con la determinación exacta de la propia cantidad de movimiento.

Tenemos entonces que la determinación de la posición espacial de una partícula elemental en una dimensión, no afecta en nada la determinación de la propia posición en esa misma dimensión, ni tampoco en cualquiera otra dimensión espacial. Igualmente, tenemos que la determinación de la componente de la cantidad de movimiento de una partícula elemental en una dimensión espacial, no influye en la determinación de la componente de la cantidad de movimiento en cualquiera otra dimensión, sin exceptuar la primera. Lo único que no es posible es determinar simultáneamente, con una precisión infinita, la componente de la cantidad de movimiento y la posición con respecto a una misma dimensión.[7] Desde el punto de vista lógico, la relación entre los conceptos de "posición precisamente determinada" y de "cantidad de movimiento precisamente determinada", para una misma partícula elemental y en el mismo tiempo, se puede expresar por medio de un juicio de incompatibilidad. En consecuencia,

[7] La precisión tiene el límite finito, determinado con toda exactitud y representado por la magnitud $\frac{h}{4\pi}$, o sea, la mitad de la unidad de cantidad de movimiento angular para las partículas elementales.

se tiene un trilema entre los dos términos conceptuales, cuyas alternativas son: el cumplimiento del primero junto con el incumplimiento del segundo; el cumplimiento del segundo acompañado del incumplimiento del primero; o el incumplimiento del primer término aparejado con el incumplimiento del segundo.[8] Por lo tanto, en nuestro caso existen tres posibilidades: la determinación precisa de la posición, en detrimento de la determinación precisa de la cantidad de movimiento; la determinación precisa de la cantidad de movimiento, a costa de la determinación precisa de la posición; y la determinación simultánea de la posición y la cantidad de movimiento con imprecisión.[9]

Ahora bien, el carácter incierto que asume la determinación simultánea de la posición y la cantidad de movimiento de una partícula elemental, no resulta en modo alguno del procedimiento empleado en la medición, tampoco se produce como consecuencia de los errores cuantitativos cometidos en la observación de la medida, ni depende del nivel alcanzado actualmente por nuestro conocimiento. En rigor, las relaciones de incertidumbre constituyen la expresión de una propiedad objetiva de las partículas elementales, que ha sido comprobada reiteradamente en los experimentos. Esta característica de no poseer un valor estrictamente determinado para su posisión espacial y su cantidad de movimiento, en forma simultánea, hace que las partículas elementales difieran notablemente de las partículas mesocósmicas que sí muestran tener dicha propiedad. Por otra parte, aun cuando algunas veces se les ha dado el nombre de "relaciones de indeterminación", lo cierto es que las relaciones de Heisenberg no tienen nada de indeterminadas; porque la importante propiedad que expresan no es prueba ni indicio alguno de la existencia de una indeterminación definitiva o insuperable, ni en lo que respecta a las propiedades de

[8] Para la caracterización de este tipo de juicio, véase De Gortari, *Introducción a la lógica dialéctica*, pp. 149-153, 169-170, 173 y 175.

[9] Ya que existe ese límite finito para la precisión que se puede conseguir en una determinación simultánea y cuyo valor es el expresado justamente por las relaciones de incertidumbre.

las partículas elementales, ni tampoco en relación con su comportamiento.[10] En realidad, las relaciones de incertidumbre no tienen nada de indeterminadas. Por lo contrario, dichas relaciones expresan matemáticamente una ley determinada con toda exactitud, acerca de la correlación indisoluble existente entre la cantidad de movimiento y la posición espacial de las partículas elementales. Y esa correlación representa una conexión física que explica otras de las propiedades peculiares que tienen las partículas elementales.

El hecho de que la posición y la cantidad de movimiento no se puedan determinar simultáneamente con respecto a una misma partícula elemental, de un modo preciso y distinto, ha dado lugar a una interpretación arbitraria que se puede resumir en la postulación del llamado "principio de complementariedad" de Bohr.[11] Ante todo, es necesario poner en claro que dicho "principio" no coincide con las relaciones de incertidumbre.[12] Enfocándolo desde el punto de vista lógico, el "principio de complementariedad" representa la transformación de las relaciones de incertidumbre —que, como hemos visto, son expresables por medio de un juicio de incompatibilidad— en otra relación conceptual diferente, que corresponde por su forma a un juicio de exclusión. En esta clase de juicio se expresa la oposición irreductible entre dos términos conceptuales, constituyendo un dilema, cuyas dos alternativas son las siguientes: cuando se cumple uno de los términos no se cumple el otro, y viceversa; y, a la vez, el incumplimiento de un término trae aparejado el cumplimiento del otro, y recíprocamente. De esa manera, queda excluido tanto el cumplimiento simultáneo de ambos

[10] Un análisis detallado de este problema se encontrará más adelante, véase la Sección 56.

[11] N. Bohr, *La théorie atomique et la description des phénomenès*, París, Gauthier-Villars, 1932.

[12] Un examen pormenorizado de las insuficiencias y las generalizaciones indebidas de este "principio", puede verse en M. Bunge, "Strife about complementarity", *The British Journal for the Philosophy of Science, 6,* 1955, pp. 1-12 y 141-154.

términos, como el incumplimiento de los dos términos a la vez.[13] En esas condiciones, las relaciones de incertidumbre son convertidas subjetivamente en una exclusión radical, al propio tiempo que la imprecisión en la determinación simultánea es considerada imposible y tenida, por ende, como inexistente. Por lo tanto, las tres posibilidades realmente existentes son reducidas inconsecuentemente por el "principio de complementariedad" a sólo dos alternativas: la determinación precisa de la posición espacial o la determinación precisa de la cantidad de movimiento. Después, los complementaristas han extendido esa supuesta exclusión mutua, todavía con menos fundamento, para considerar que únicamente son posibles en definitiva dos clases de dispositivos experimentales: los que permiten determinar la cantidad de movimiento de una partícula elemental y los que sirven para determinar la posición de la misma partícula. Con la advertencia de que, según los complementaristas, la utilización de un dispositivo instrumental de una de esas clases, implica la renuncia completa al empleo de cualquier dispositivo experimental de la otra clase, en tratándose del mismo caso. Como consecuencia, tal como lo afirman últimamente los complementaristas, lo que percibimos por medio de un dispositivo experimental depende enteramente de la clase de dispositivo que se utilice.[14]

No obstante la enorme importancia que tiene el hecho expresado por las relaciones de incertidumbre, es indispensable aclarar que éstas conciernen únicamente a ciertas parejas de magnitudes físicas, como son la posición y la cantidad de movimiento, o la energía y el tiempo.[15] En cambio, no abarcan otras propiedades fundamentales de

[13] Para la caracterización de esta clase de juicio véase De Gortari, *Introducción a la lógica dialéctica,* pp. 153-157, 169-170, 173 y 175.

[14] Así, dice Niels Bohr: "Los fenómenos son, en cierto modo, engendrados por las observaciones repetidas... (y) no se puede... atribuir a los fenómenos, ni al instrumento, una realidad física autónoma, en el sentido ordinario de la palabra", *La théorie atomique et la description des phénomenès,* pp. 51, 64.

[15] Matemáticamente, tales parejas de magnitudes son aquellas cuyos valores no son conmutativos en el álgebra de las matrices, o sea, cuando el

las partículas elementales, como la masa, la carga eléctrica, el espín [16] y algunas de las manifestaciones de su energía. Esta limitación de las relaciones de incertidumbre hace más patente aún la inconsecuencia de la pretendida generalización establecida por los complementaristas. En realidad, los complementaristas sostienen a todo trance los conceptos clásicos de posición y de cantidad de movimiento, atribuyéndoles un carácter absoluto e inmutable, para concluir luego que su exclusión recíproca en el caso de las partículas elementales, demuestra la incognoscibilidad irremediable de las propiedades de dichas partículas o, lo que es lo mismo, la imposibilidad de conocer objetivamente a las partículas mismas. Por otra parte, y esto es lo que más interesa destacar, el "principio de complementariedad" no conduce a ninguna ampliación de nuestros conocimientos, ni tampoco permite formular ninguna hipótesis cuyas consecuencias pudieran ser sometidas a la prueba de la verificación experimental. En suma, tenemos que el "principio de complementariedad" constituye una generalización extralógica de las relaciones de incertidumbre, la cual se trata de presentar como su única interpretación posible, no obstante que, en lugar de contribuir al análisis que es indispensable hacer, para formular objetivamente el significado real de las categorías físicas en el dominio de las partículas elementales, se contenta simplemente con atribuir un carácter absoluto, nada científico, a las concepciones de la mecánica clásica. Y, de este modo, es como los complementaristas intentan convertir las propiedades fundamentales de la existencia en el nivel microcósmico, en categorías subjetivas e irracionales.

8. Extensión y cantidad de movimiento

Volviendo a las relaciones de incertidumbre, conforme a ellas parece ser conceptualmente imposible determinar la

cambio en el orden en que se toman dichos valores como factores produce una alteración en el valor de su producto.

[16] El espín es la cantidad de movimiento angular de una partícula elemental.

posición y la cantidad de movimiento de una partícula elemental, en un mismo instante, con una precisión que exceda a la admitida por las desigualdades establecidas por Heisenberg. Dicho de otra manera, lo que sucede es que la cantidad de movimiento y la posición forman una pareja de magnitudes conjugadas, cuya determinación precisa no se puede hacer por separado. Sin embargo, si examinamos críticamente las ecuaciones fundamentales de la propia mecánica cuántica nos encontramos con que, en una de ellas, la cantidad de movimiento p de una partícula elemental está determinada por la constante cuántica universal h, la frecuencia de su movimiento ondulatorio ν y la velocidad de la luz c, de acuerdo con la siguiente relación:

$$p = \frac{h\nu}{c}.$$

Ahora bien, como la frecuencia es simplemente el número de crestas de onda que pasan por un punto en la unidad de tiempo, se puede expresar mediante la relación entre la velocidad de la luz c y la longitud de onda λ, es decir:

$$\nu = \frac{c}{\lambda};$$

y este valor de ν, se puede sustituir en la ecuación anterior de la cantidad de movimiento, que queda:

$$p = \frac{hc}{c\lambda};$$

entonces, eliminando a c, tenemos:

$$p = \frac{h}{\lambda}.$$

Desde el punto de vista dimensional, esta ecuación expresa que la cantidad de movimiento es igual a la energía multiplicada por el tiempo y dividida entre la longitud de onda. Recíprocamente, despejando en esta última ecuación a la longitud de onda λ, tenemos:

$$\lambda = \frac{h}{p};$$

que dimensionalmente expresa que la longitud de onda es igual a la energía multiplicada por el tiempo y dividida entre la cantidad de movimiento. Para el caso de las partículas elementales, que se mueven a velocidades inferiores a la de la luz, el resultado es el mismo. En efecto, en tal caso la velocidad de la luz c se sustituye por la velocidad ondulatoria V de la partícula, con lo cual tenemos la ecuación:

$$p = \frac{h\nu}{V}.$$

La frecuencia es entonces:

$$\nu = \frac{V}{\lambda};$$

sustituyendo este valor en la ecuación anterior, resulta:

$$p = \frac{hV}{V\lambda},$$

y eliminando a V, obtenemos:

$$p = \frac{h}{\lambda};$$

por consiguiente, al despejar la longitud de onda λ, queda la misma ecuación que en el caso anterior:

$$\lambda = \frac{h}{p}.$$

Además, es necesario tener presente que la validez de la ecuación:

$$p = \frac{h}{\lambda};$$

se encuentra verificada objetivamente en la realidad, con los experimentos de Davisson y Germer para los electrones, y de Stern, Johnson y otros para las demás partículas elementales.[17]

[17] C. Davisson y L. H. Germer, *Physical Review, 29,* 1927, p. 908. Los detalles de estos experimentos sobre la difracción de las partículas elementales se pueden encontrar en J. J. Trillat, *Les preuves experimentales de la mécanique ondulatoire,* París, Hermann et Cie., 1934.

De lo anterior resulta que el cumplimiento de estas ecuaciones, comprobadas experimentalmente, impone la necesidad de tomar en cuenta simultáneamente la cantidad de movimiento y una propiedad espacial, como lo es la longitud de onda, de una y la misma partícula elemental, para poder realizar los cálculos correspondientes. Más aún, las ecuaciones requieren ineludiblemente la consideración de valores precisos para ambas magnitudes. Lo cual, conforme a las relaciones de incertidumbre, es justamente imposible hacer con precisión respecto a la cantidad de movimiento y otra propiedad espacial, como es la posición ocupada que, por cierto, es una magnitud que se fija por medio de longitudes. Así, nos enfrentamos a una paradoja insostenible: por un lado, la imposibilidad de hacer la determinación precisa y simultánea de la cantidad de movimiento y de las longitudes que localizan a una partícula espacialmente; mientras que, por otra parte, tenemos a la vez la necesidad ineludible de hacer la determinación precisa y simultánea de la cantidad de movimiento y la longitud de onda, propiedad espacial también, de una partícula elemental. En consecuencia, tenemos que llegar a la conclusión de que no sólo *es conceptualmente posible,* sino que igualmente *es experimentalmente necesario* determinar a la vez y para una y la misma partícula elemental, la magnitud de su cantidad de movimiento y de una de sus propiedades espaciales. Y, como se puede advertir claramente, no se trata de que este conocimiento simultáneo se obtenga indirectamente a través de inferencias matemáticas, sino que se obtiene directamente en los experimentos; puesto que, de otro modo, no se habría podido comprobar la ecuación a que nos hemos referido.

La misma irreductibilidad de la oposición que destacamos, plantea abiertamente la urgencia de superar esa paradoja, resolviéndola dialécticamente. En rigor, son los propios términos en que se plantea la contradicción los que nos permiten esbozar su solución. Desde luego, tenemos que considerar a la cantidad de movimiento de una partícula elemental, como otra forma en la cual se ma-

nifiesta su longitud de onda, o sea, como una propiedad espacial. A la vez, tenemos que reconocer en la longitud de onda de la propia partícula, otra manera en la cual se muestra su cantidad de movimiento. Entonces, en este sentido, el espacio tiene que ser considerado conjuntamente como extensión y como cantidad de movimiento. O, más bien dicho, tenemos que reconocer a la cantidad de movimiento y la extensión como dos formas, diferentes e inseparables, a través de las cuales se manifiesta ese modo de existencia de las partículas elementales que constituye lo que llamamos sus propiedades espaciales, o bien, de un modo abreviado, el espacio.[18] Por lo tanto, el espacio comprende dos aspectos, que son la extensión y la cantidad de movimiento. Entonces, su relación lógica se puede expresar en función de un juicio de inclusión. Dicha relación representa un trilema entre los dos términos conceptuales, cuyas alternativas son: el cumplimiento de un término acompañado del incumplimiento del otro; el cumplimiento del otro término junto con el incumplimiento del primero; y el cumplimiento simultáneo de ambos términos.[19] De esa manera, tendríamos el enunciado primordial siguiente: *Respecto a las partículas elementales, el espacio se puede manifestar como extensión, o como cantidad de movimiento o, bien, como extensión y cantidad de movimiento a la vez.* Así quedan satisfechas, por una parte, las relaciones de incertidumbre y, por otro lado, las ecuaciones que enlazan directamente la cantidad de movimiento con la longitud de onda de las partículas elementales. Lo cual es posible, entre otras cosas, por la coincidencia de la constante cuántica *h,* que es común a las ecuaciones mencionadas y a las desigualdades de Heisenberg.

[18] Ya la teoría de la relatividad se ha encargado de demostrar antes, dentro de su dominio, que el espacio se encuentra vinculado a la cantidad de movimiento de la misma manera como el tiempo está enlazado con la energía.

[19] La caracterización de este tipo de juicio se encuentra en De Gortari, *Introducción a la lógica dialéctica*, pp. 149-153, 169-170, 172 y 175.

9. *Espacio y tiempo*

En la física cuántica se ha encontrado que las partículas elementales tienen una naturaleza integrada por dos aspectos contradictorios e indisolubles: su constitución corpuscular y su movimiento ondulatorio. El aspecto corpuscular, caracterizado por la energía y la cantidad de movimiento, representa una masa de dimensiones cuánticas y, por lo tanto, muestra su existencia discontinua. Mientras que el movimiento ondulatorio, caracterizado por la frecuencia y la longitud de onda, representa su extensión continua y homogénea. Por ello, la descripción corpuscular de una partícula elemental impone la necesidad de hacer determinaciones simultáneas de cantidad de movimiento y de energía; y su descripción ondulatoria implica indispensablemente el hacer a la vez determinaciones de lugar y de tiempo. Dificilmente se podrían concebir dos nociones que, al parecer, fuesen menos susceptibles de estar enlazadas. Pero lo cierto es que la onda y el corpúsculo se encuentran conjugados realmente en la síntesis unitaria e indivisa de la partícula elemental. Esta conjugación se muestra con claridad en las relaciones existentes entre la energía y la cantidad de movimiento, que corresponden al aspecto corpuscular de la partícula elemental; lo mismo que entre la frecuencia y la longitud de onda, que corresponden a su aspecto ondulatorio. La conjugación inseparable entre ambos aspectos se muestra también en el hecho de que la cantidad de movimiento y la longitud de onda son dos maneras diferentes en que se exhiben las propiedades espaciales; [20] en tanto que la energía y la frecuencia son dos modos distintos en que se manifiestan las propiedades temporales.[21] Lo que es más, dicha conjugación se muestra igualmente en las relaciones existentes entre esas cuatro magnitudes a la vez, que caracterizan conjuntamente a la partícula elemental. Lo

[20] Tal como se expuso en la Sección 7.
[21] Véase, más adelante, la Sección 18.

cual significa que espacio, tiempo, energía y cantidad de movimiento están enlazados de todas las maneras posibles, teórica y experimentalmente, tal como se expresa en las ecuaciones fundamentales de la mecánica cuántica. En efecto, dichas ecuaciones vinculan por parejas a esas cuatro magnitudes, en las seis relaciones que se pueden establecer entre ellas.[22]

Por otra parte, debido al hecho de que entre las partículas elementales se encuentran los fotones o cuantos de radiación, y como las otras partículas se mueven con velocidades comparables a la de la luz, es indispensable considerar las propiedades descubiertas por la teoría de la relatividad, que se cumplen también en los procesos microcósmicos. Desde luego, esa consideración nos lleva a saber que las propiedades de las partículas elementales no se pueden determinar aisladamente en el espacio, sino que tienen que ser determinadas simultáneamente en el tiempo. Esto quiere decir que es indispensable introducir el espacio-tiempo relativista, por lo menos como una hipótesis susceptible de sufrir modificaciones ulteriores. Pues bien, de acuerdo con la física relativista, la distancia y el intervalo temporal que separan a dos acontecimientos cualesquiera, se encuentran conjugados en el intervalo de espacio-tiempo. Por otro lado, debido a que la velocidad de la luz constituye el límite máximo de la velocidad a la cual se puede transmitir la energía, resulta que la simul-

[22] Las seis relaciones posibles se cumplen efectivamente en las ecuaciones, de la manera siguiente:

entre la energía y la cantidad de movimiento: $E = pc$;

entre la frecuencia y la longitud de onda: $\nu = \frac{c}{\lambda}$;

entre la cantidad de movimiento y la longitud de onda: $p = \frac{h}{\lambda}$;

entre la longitud de onda y la energía: $\lambda = \frac{hc}{E}$;

entre la energía y la frecuencia: $E = h\nu$;

y entre la cantidad de movimiento y la frecuencia: $p = \frac{h\nu}{c}$.

taneidad entre dos procesos es relativa y depende de la localización del sistema de referencia. Igualmente, la distancia entre dos procesos también es relativa, ya que depende de su movimiento. Por lo tanto, es imposible determinar la simultaneidad o la sucesión de los procesos, sin determinar sus distancias; y, recíprocamente, es imposible establecer las distancias entre los procesos, sin determinar su sucesión o su simultaneidad. Por otra parte, como ya lo hemos expresado antes, las propiedades métricas del espacio dependen de la distribución de las masas y las energías de los procesos; por lo cual resulta que la distancia más corta entre dos puntos no es una línea recta, sino la trayectoria de menor resistencia. Por otro lado, en el continuo espacio-tiempo también se encuentran fundidas en una unidad la energía y la cantidad de movimiento. Por consiguiente, además del vector tetradimensional en el cual se encuentran conjugados el espacio y el tiempo (x, y, z, t), existe igualmente otro vector tetradimensional cuyas magnitudes conjugadas son las componentes de la cantidad de movimiento y la energía con signo negativo $(p_x, p_y, p_z, -E)$.

Tal como se ha comprobado experimentalmente, cuando se determinan con precisión la cantidad de movimiento y la energía de una partícula elemental, o sean, las características de su aspecto corpuscular, lo que se consigue es que la partícula se haga difusa a través de una enorme extensión espacial, perdiéndose casi por completo su aspecto corpuscular. Análogamente, cuando se determina con exactitud la posición de una partícula elemental en un instante dado, esto es, las características de su movimiento ondulatorio, lo que se obtiene es una extremada imprecisión de su estado de movimiento. Dicho de otra manera, cuando se determinan las características corpusculares de la partícula elemental, se manifiesta su aspecto ondulatorio; y, viceversa, cuando se determinan sus características ondulatorias se muestra su aspecto corpuscular. Entonces, tenemos que la determinación del estado de movimiento de la partícula elemental —es decir, de sus condiciones di-

námicas— y su localización espacio-temporal —o sea, la determinación de sus condiciones de movimiento—, parecen ser dos planos de la realidad que no es posible enfocar con precisión al mismo tiempo. Más aún, cuando se enfoca uno de esos planos con la mayor exactitud, lo que se observa con nitidez es justamente el otro plano; y, recíprocamente, cuando el enfoque preciso se hace sobre el otro plano, entonces se observa claramente el primero. Por lo tanto, no se trata en rigor de una exclusión mutua sino que, por el contrario, este hecho señala justamente la conexión estrecha e inseparable que existe entre ambos enfoques. Con lo cual tenemos otra prueba de la conjugación entre la cantidad de movimiento, la energía, el tiempo y el espacio, en el dominio de los procesos microcósmicos.

Ahora bien, la existencia del cuanto de acción implica una especie de interdependencia entre la localización de la partícula elemental en el espacio y el tiempo, y la especificación de su estado dinámico. Esta interdependencia es expresada por las relaciones de incertidumbre y tiene un carácter nuevo y completamente extraño a las concepciones de la física clásica. Incluso, en el dominio de los procesos microcósmicos se plantea la exigencia de ir todavía más allá de las condiciones descubiertas por la física relativista. Por consiguente, además de la mutua influencia entre el espacio-tiempo y la distribución estática de energía y masa, parece ser necesario incluir la consideración del estado dinámico de las partículas elementales. Esto apunta la necesidad de conjugar el aspecto cinemático y el aspecto dinámico, junto con la oposición existente entre ellos que se encuentra contenida en el cuanto de acción. Desde luego, las propiedades espaciales de las partículas elementales no se pueden representar rigurosamente en el marco clásico del espacio y el tiempo. Y, según parece, tampoco la forma de representación espacio-temporal establecida por la teoría de la relatividad, sirve para explicar dichas propiedades espaciales. Sin embargo, teniendo en cuenta el camino seguido para el establecimiento del espacio-tiempo relativista, parece ser justo el considerar conjun-

tamente otras propiedades de las particulas elementales. Este camino es indicado además, de modo confluyente, por los propios resultados experimentales de la mecánica cuántica. En todo caso, el espacio y el tiempo, bien definidos y perfectamente utilizables en los dominios mesocósmico y macrocósmico, no son estrictamente adecuados para la descripción de la realidad física en el dominio microcósmico. Los resultados experimentales y las insuficiencias de la teoría cuántica actual, sugieren el abandono de tales conceptos, de manera análoga a lo que sucede con el concepto de temperatura —que es simplemente la manifestación de la agitación molecular—, el cual pierde su significado cuando se llega al nivel de las propias moléculas y, más aún, cuando se penetra hasta el nivel de los átomos o de las partículas elementales.

10. *Dimensionalidad del espacio*

Las tres dimensiones del espacio se han obtenido como resultado de la experiencia cotidiana de todos los hombres y se han comprobado reiteradamente, sin excepción, en los experimentos científicos. La tridimensionalidad del espacio es una condición física indispensable para que se ejerzan las interacciones causales entre los procesos. También para la explicación de las propiedades químicas de las sustancias, es ineludible el estudio de la estructura tridimensional de las moléculas. En el dominio de la biología, los organismos vivos tienen objetivamente en su mismo cuerpo una diferenciación clara de las tres dimensiones del espacio. Su propia forma está dispuesta conforme a tres planos de simetría o de asimetría, que son respectivamente perpendiculares entre sí. Esta simetría es, al mismo tiempo, una conformación dinámica, puesto que los animales se mueven en la dirección definida por su plano de simetría. Además, el animal distingue los movimientos por los cambios de posición de las partes de su cuerpo, por el desplazamiento de los otros objetos y por la expansión y la contracción que sufren las formas cuando se acercan o se

alejan, ya sea por el translado de ellas mismas o por el movimiento del animal. En fin, la investigación biológica ha comprobado que las sensaciones de dirección son auténticas experiencias de los sentidos del animal. En efecto, los conductos semicirculares que forman el laberinto del oído son tres pequeños canales excavados en el hueso, orientados perpendicularmente, cuya excitación produce la sensación de dirección. Así, el estímulo del canal sagital provoca las sensaciones de adelante y atrás, el del canal transversal corresponde a las sensaciones de arriba y abajo, y la excitación del canal horizontal trae por resultado las sensaciones de izquierda y derecha. En cuanto al dominio de la psicología, el concepto del espacio se forma en relación directa con la integración de la conciencia, ya que ésta no es otra cosa que conciencia de la existencia. A la vez, la conciencia es la conexión práctica del hombre con la existencia objetiva, la cual se expresa por medio de la acción. Como consecuencia, el espacio se refleja necesariamente en la conciencia como un medio tridimensional homogéneo, constituido por una multitud de singularidades, que son los diversos objetos que lo integran. Y este medio se ofrece al hombre como un campo para ejecutar sus propias actividades y practicar su poder de transformación de los procesos existentes.

En la geometría más general, la topología, se ha encontrado la demostración de dos teoremas fundamentales. De acuerdo con uno de ellos, el espacio no puede tener dos dimensiones, ni tampoco menos de dos. Según el otro teorema, el espacio no puede tener cuatro dimensiones, ni tampoco más de cuatro. Entonces, tomando conjuntamente ambos teoremas, concluimos que el espacio tiene exactamente tres dimensiones, ni una más ni una menos; puesto que sería imposible que tuviera dos y una fracción o tres y una fracción de dimensión.[23] Igualmente se ha demostrado que la tridimensionalidad del espacio es una invariante topológica, esto es, que es una propiedad que permanece invariante ante todas las transformaciones con-

[23] H. Poincaré, *La valeur de la science,* París, Flammarion, 1905, p. 51.

tinuas de las coordenadas.[24] El hecho de que el espacio tenga tres y sólo tres dimensiones, significa que para dividirlo en partes es necesario practicar cortaduras que denominamos superficies. Análogamente, para dividir las superficies utilizamos las cortaduras llamadas líneas y, para hacer separaciones en éstas, empleamos las cortaduras a las que damos el nombre de puntos. Y aquí tenemos que detenernos, porque el punto no es un continuo y, por ende, no puede ser dividido. Entonces, las líneas son continuos de una dimensión que pueden ser divididas por medio de cortaduras que no son continuos. Las superficies son continuos de dos dimensiones que separamos mediante continuos monodimensionales. Y el espacio es un continuo de tres dimensiones que cortamos por continuos bidimensionales. De este modo, utilizando la definición por recurrencia, el continuo de n dimensiones queda determinado por medio de cortaduras practicadas con continuos de $(n-1)$ dimensiones.[25] Por último, la necesidad de considerar al espacio con tres dimensiones, excluyendo cualquier número mayor o menor de ellas, es una imposición objetiva de la realidad existente. Por eso, cualquier intento de obtener esa tridimensionalidad con base exclusiva en la razón, constituye un problema cuya solución es imposible.[26]

Como es sabido, matemáticamente es posible establecer espacios de un número cualquiera de dimensiones. Para ello es suficiente con proseguir adelante utilizando la definición por recurrencia a que acabamos de referirnos. De esa manera, un espacio de 13 dimensiones, por ejemplo, es un continuo determinado por cortaduras dodecadimensionales; o también, más sencillamente, se puede establecer por medio de ecuaciones de 13 variables, en lugar de las ecuaciones de tres variables que se emplean en geometría

[24] L. E. J. Brouwer, "Beweis der Invarianz der Dimensionenzahl", *Math. Ann., 70,* 1911, pp. 161-165.

[25] H. Poincaré, *Dernières pensées,* París, Flammarion, 1913, p. 50.

[26] H. Grassmann, *Teoría de la extensión,* Buenos Aires-México, Espasa-Calpe, 1947, p. 23.

analítica, de tal modo que cada variable represente una de las coordenadas del espacio matemático en cuestión. Además, es posible representar un espacio de cierto número de dimensiones, en otros espacios de diferente número de dimensiones. Así se puede transformar matemáticamente, por ejemplo, el espacio tridimensional en un espacio tetradimensional o polidimensional. Solo que, en tal caso, la representación no resulta ser enteramente recíproca, porque la transformación no es biunívoca y continua.[27] Por consiguiente, al ejecutar una transformación de esta especie, no solamente se despoja al número de dimensiones espaciales de su significado objetivo, sino que se pierde la continuidad de la conexión causal existente entre los procesos que constituyen el espacio. Entonces, tenemos que la teoría matemática de los espacios de más de tres dimensiones, o hiperespacios, no se refiere propiamente al espacio físico, sino que es únicamente un instrumento matemático definido para estudiar conjuntos de procesos, con respecto a un número cualquiera de sus propiedades comunes, las cuales son representadas justamente de manera simbólica por las correspondientes "dimensiones".

Pues bien, de acuerdo con la formulación ondulatoria de la física cuántica, las ondas de una sola partícula elemental se propagan en un espacio de tres dimensiones. Pero, en cambio, cuando se trata de dos partículas que se encuentran en interacción, entonces sus ondas se propagan en un hiperespacio de seis dimensiones; y, en el caso de un millón de partículas en interacción, la propagación de sus ondas ocurre en un hiperespacio de tres millones de dimensiones. En general, para representar matemáticamente la propagación ondulatoria de n partículas en interacción, se requiere la consideración de un hiperespacio de $3n$ dimensiones. La única excepción surge cuando se trata de partículas que no se actúan mutuamente, como los fotones por ejemplo, cuya propagación ondulatoria se puede representar siempre en el espacio de tres dimensio-

[27] L. E. J. Brouwer, "Ueber den natürlichen Dimensionbegriff", *J. reine U. angew. Math., 142,* 1913, pp. 146-152.

nes, cualquiera que sea el número de partículas consideradas. Esta extraña necesidad de la mecánica ondulatoria suscita de inmediato una objeción importante: la incongruencia que resulta de sostener, por una parte, la realidad física de las ondas conforme a su representación matemática y, por otro lado, el tener que utilizar un hiperespacio matemático, que es enteramente ficticio como representación del espacio físico. Esto no impide, sin embargo, que la forma ondulatoria de la física cuántica constituya una primera aproximación teórica hacia la explicación de los procesos microcósmicos; la cual, por lo demás, sirve como fructuosa hipótesis de trabajo para las investigaciones. En realidad, lo que ocurre es que, dentro del aparato matemático de la mecánica ondulatoria, las ondas de las partículas elementales son simplemente representaciones diagramáticas de probabilidades. Y esto explica el porqué se necesita trabajar con un hiperespacio que tenga tantas dimensiones como el triple del número de partículas elementales existentes en el sistema considerado. El hecho de que el número de dimensiones requeridas para el hiperespacio sea precisamente el triple del número de partículas integrantes del sistema, sugiere desde luego que la anomalía puede provenir de la imposibilidad de conjugar las propiedades espaciales de las diversas partículas en un espacio único, debido a las insuficiencias del aparato matemático utilizado. Entonces, simplemente se yuxtaponen los espacios singulares de cada partícula elemental, conservando su separación; de manera semejante a lo que sucede en la conciencia del niño, que separa su propio espacio de las propiedades espaciales de los otros objetos, hasta que logra establecer su integración en un espacio común y único. Por otra parte, la necesidad de emplear tales hiperespacios señala también que es indispensable considerar, juntamente con las cualidades espaciales de las partículas elementales, las otras propiedades temporales y dinámicas que se encuentran conectadas inseparablemente con ellas. En consecuencia, nos encontramos aquí con otro indicio poderoso de la urgente necesidad de establecer una especie de con-

tinuo espacio-cantidad de movimiento-energía-tiempo, dentro del cual sean co-eficientes estas cuatro propiedades.

11. *Caracteres cuánticos del espacio*

Con el propósito de encontrar una explicación satisfactoria de los procesos de emisión y absorción de energía radiante que se producen en los átomos, Bohr propuso la introducción de una condición limitante respecto al movimiento de los electrones atómicos.[28] Con arreglo a dicha condición, los electrones solamente se pueden mover alrededor del núcleo describiendo ciertas trayectorias privilegiadas, llamadas órbitas cuánticas, cuyas distancias al núcleo atómico forman una serie de valores discretos. Cada uno de los términos de esta serie cumple con la exigencia de que la cantidad de movimiento angular resultante para el electrón, sea un múltiplo entero de la constante h de Planck dividida entre 2π; esto es, el doble de la magnitud finita que expresa el límite de la precisión en las relaciones de incertidumbre.[29] Esta condición crítica, sugerida primero como una hipótesis provisional sin fundamento teórico, se ha convertido después en una consecuencia directa de las ecuaciones que representan el comportamiento de los procesos atómicos, tanto en la mecánica ondulatoria como en la mecánica de las matrices y en la teoría relativista cuántica.[30] Por lo tanto, ahora se encuentra explicada consecuentemente la existencia de tales órbitas cuánticas privilegiadas. Es más, de una manera coincidente, la consideración ondulatoria del movimiento de los electrones lleva a establecer que sus trayectorias atómicas tienen necesariamente longitudes que son múltiplos enteros de la longitud de onda de los propios electrones. Lo cual significa que el movimiento orbital y el movimiento ondula-

[28] N. Bohr, *Phil. Mag., 26,* 1913, pp. 1, 476, 857.

[29] En el caso más simple, del átomo de hidrógeno, la distancia entre el núcleo y la primera órbita es de 0.527×10^{-8} cm.

[30] W. Wilson, *Phil. Mag., 29,* 1915, p. 795; Ishiwara, *Tokyo Math. Phys. Proc., 8,* 1915, p. 106; A. Sommerfeld, *Ann. d. Physik, 51,* 1916, p. 1.

torio intrínseco de los electrones no son independientes.[31] De esta manera, las órbitas discretas de los electrones quedan determinadas por una condición de estabilidad impuesta por la continuidad de su movimiento ondulatorio; y, por consiguiente, esta explicación constituye una superación dialéctica de la oposición que se plantea entre la continuidad ondulatoria y la discontinuidad cuántica, en uno de sus aspectos.

Tenemos entonces que a cada una de las órbitas cuánticas posibles le corresponde una energía de magnitud definida. Por ende, esa energía únicamente puede asumir valores discretos, que son denominados "niveles de energía". A cada uno de tales niveles le corresponde un estado diferente del átomo, un "estado cuántico", caracterizado por el movimiento del electrón en una de las órbitas cuánticas posibles. En esas condiciones, tenemos que la localización espacial de las órbitas electrónicas está especificada por la cuantización de la cantidad de movimiento, la cuantización de la energía y una dimensión finita de la longitud de onda de los electrones mismos.[32] A la vez, esta especificación espacial de las órbitas electrónicas tiene un carácter enteramente cuántico, ya que existe una estricta discontinuidad entre las distancias de las órbitas al núcleo atómico, que se encuentran dosificadas como múltiplos enteros de la distancia mínima elemental. Por lo tanto, también existe una rigurosa discontinuidad entre las longitudes de las propias trayectorias orbitales. Por otra parte, tenemos la consideración de que el paso de un electrón de una órbita a otra se produce bruscamente, como un

[31] Como se advierte, sucede lo contrario de lo que ocurre entre el movimiento de translación y el movimiento de rotación de un planeta como la Tierra, ya que su recorrido de una vuelta completa alrededor del Sol, no coincide con un número entero de sus rotaciones diurnas. En cambio, la revolución orbital de los electrones es análoga a la de la Luna, en la cual su revolución alrededor de la Tierra coincide exactamente con una rotación completa, siendo esta la razón de que siempre nos presente la misma cara.

[32] Téngase en cuenta que, para una velocidad constante, a la dimensión finita de la longitud de onda le corresponde una dimensión también finita de la frecuencia u oscilación temporal.

"salto cuántico", es decir, como otra discontinuidad. Lo único explícito en este cambio repentino de la localización de un electrón, al pasar de una órbita a otra, es que en su realización se cumple con los principios de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento. En consecuencia, el átomo tiene que absorber o emitir la energía correspondiente a la diferencia entre los dos niveles en que se produce el salto cuántico del electrón. Cuando la transición es de una órbita interna a un nivel externo, tiene que haber absorción de energía por parte del átomo; y, en el caso inverso, habrá emisión de energía. Dicha energía es absorbida o emitida ordinariamente en forma de radiación y su magnitud se encuentra conectada entonces con la frecuencia de su propagación ondulatoria. A su vez, las frecuencias de la radiación se manifiestan como términos definidos en el espectro respectivo, de tal manera que cada término espectral corresponde a un nivel de energía diferente y, por lo tanto, a un estado cuántico distinto.[33]

Por lo anterior, tenemos que el espacio interno de los átomos es de naturaleza cuántica y, por ende, discontinua. De un modo aproximado, lo podemos representar como una sucesión de lugares geométricos continuos, que son las órbitas cuánticas posibles, las cuales están separadas por extensiones discontinuas en donde jamás se pueden encontrar los electrones. Sin embargo, esas extensiones discontinuas que separan a las órbitas estables permiten el paso de los electrones de una órbita a otra, en la forma de saltos bruscos. Es decir, que el enlace dinámico entre las trayectorias continuas se efectúa a través de la discontinuidad que media entre ellas. Así resulta que el espacio interno del átomo está constituido por trozos de continuidad, que son las trayectorias electrónicas, cuyo enlace se establece de manera intermitente y súbita, por intermedio de trozos discretos en donde es imposible la permanencia de los electrones. Estos saltos bruscos de una órbita a otra, es-

[33] Esta teoría explica más de 50 de los términos observados en el espectro del átomo de hidrógeno, lo mismo que en los espectros de los átomos ionizados semejantes al del hidrógeno.

tablecen justamente una solución de continuidad, que impide su representación en un espacio continuo; y que, por supuesto, tampoco corresponde a una continuidad del tiempo. Por lo demás, en los trozos continuos en los cuales sí es posible la permanencia de los electrones, la posición del electrón —dado que su órbita es un lugar geométrico— se encuentra enteramente determinada por su cantidad de movimiento. Y, recíprocamente, la cantidad de movimiento de un electrón está determinada completamente por su posición orbital, que incluye su distancia discreta al núcleo y la longitud definida de la misma trayectoria. En consecuencia, a cada cantidad de movimiento angular cuyo valor sea un múltiplo de la constante cuántica $\frac{h}{2\pi}$, le corresponde una órbita electrónica con una posición bien definida. Igualmente, a la posición cuántica de cada órbita electrónica posible, le corresponde una cantidad de movimiento angular precisamente determinada. Por lo tanto, nuevamente nos encontramos aquí con la conjugación objetiva de la posición y la cantidad de movimiento de las partículas elementales.

12. *Discontinuidad cinemática*

Cuando en un punto cualquiera *A* se encuentra una fuente luminosa en donde ocurre un proceso elemental de emisión de energía radiante, y en otro punto cualquiera *B* hay una partícula que termina un proceso elemental de absorción de energía, entonces parece posible considerar que el fotón emitido en el punto *A* ha viajado en línea recta hasta el punto *B*, en donde ha sido absorbido. Pero esta consideración acerca de la rectilinearidad de la trayectoria, se modifica cuando colocamos una pantalla opaca provista de un pequeño orificio, entre los puntos *A* y *B*. Porque entonces, debido al fenómeno de difracción, puede ocurrir que el fotón no llegue al punto *B*, no obstante que el orificio de la pantalla esté alineado con *A* y con *B;* o bien, puede suceder que el fotón llegue

a *B*, a pesar de que el orificio se encuentre fuera de la recta que une *A* con *B*. Si repetimos este procedimiento, interponiendo otras muchas pantallas provistas de pequeños orificios, en distintos puntos situados entre *A* y *B*, podremos advertir cómo la trayectoria del fotón se seguirá quebrando cuanto queramos, de tal manera que será imposible tenerla localizada con precisión. Entonces, resulta que únicamente se puede determinar con precisión la salida y la llegada del fotón, o sea, su emisión y su absorción; pero, en cambio, no se puede determinar rigurosamente la trayectoria que sigue entre su emisión y su absorción. La emisión de un fotón es un proceso que presenta analogía con el disparo de un proyectil, puesto que se produce reculamiento y pérdida de energía en la fuente que lo emite. A su vez, la absorción de un fotón tiene analogía con el impacto de un proyectil, ya que trae aparejado un incremento en la cantidad de movimiento y en la energía. Es más, en el caso simple, cuando no existe otro obstáculo entre el punto de emisión y el de absorción, resulta que el fotón es absorbido exactamente después de que ha transcurrido el tiempo necesario para que recorra la distancia que separa dichos puntos, a la velocidad de la luz. No obstante, a pesar de las analogías señaladas, el comportamiento del fotón presenta una diferencia fundamental con el de un proyectil, puesto que en la trayectoria seguida por el fotón no existe estrictamente continuidad. Lo cual significa que la continuidad de la trayectoria tiene independencia lógica respecto a las otras propiedades mencionadas.[34]

Explicaremos lo anterior con mayor amplitud, extendiéndolo al comportamiento de las partículas elementales en general, ya que en todas ellas ocurre también el fenómeno de la difracción. Entonces, lo que sucede es que una partícula elemental se manifiesta únicamente cuando reacciona con otras partículas o cuando choca con ellas. Por

[34] Esta independencia lógica se ha descubierto como resultado del conocimiento experimental y no exclusivamente por medio de la reflexión racional.

lo tanto, sólo puede mostrarse de trecho en trecho y, en consecuencia, no se le puede atribuir una trayectoria continua. Ante este hecho, la mecánica cuántica se limita a vincular entre sí las diversas manifestaciones espaciales sucesivas y discontinuas de la existencia de la partícula elemental, sin poder precisar lo que sucede en el intervalo entre dichas manifestaciones. Pero, lo cierto es que las propiedades espaciales de la partícula elemental se exhiben solamente de un modo intermitente. Tampoco es posible establecer una determinación espacial continua de los electrones dentro de los átomos. Porque, para definir físicamente la trayectoria del electrón, sería indispensable poder determinar su posición en instantes sucesivos, con incertidumbres pequeñas comparadas con las dimensiones de su órbita y, también, poder repetir luego estas observaciones sobre el mismo electrón muchas veces. Sólo que, para ejecutar una observación sobre la posición del electrón con una pequeña incertidumbre resulta ineludible, debido al principio de incertidumbre, impartirle un cambio en su cantidad de movimiento; por lo cual, en la siguiente observación que se haga, el movimiento del electrón ya se encontrará perturbado. Por lo tanto, lo único posible es hacer una determinación aproximada de la órbita, procurando que la perturbación producida sea despreciable comparada con la cantidad de movimiento poseída por el electrón en su trayectoria orbital. Como era de suponer, los complementaristas interpretan esta situación en el sentido de que la órbita del electrón y su estado cuántico son magnitudes complementarias y, por ende, para ellos excluyentes. Pero, en rigor, como ya lo hemos hecho ver en el caso de otras parejas, nos encontramos nuevamente ante dos magnitudes incluyentes y, por eso mismo, susceptibles de conjugarse. Con todo, lo que parece obligado es el abandono de la consideración de que las partículas elementales sigan trayectorias continuas en su movimiento. Ya que, aún cuando en algunos casos se pueden especificar experimentalmente dos puntos de la trayectoria de una partícula elemental, sin embargo, por los

hechos antes apuntados, no es consecuente en rigor considerar que el intervalo espacial recorrido entre esos dos puntos sea continuo. Entonces, como conclusión, tenemos que aceptar la posibilidad de que exista una discontinuidad cinemática en el nivel microcósmico de la existencia.

13. *Politopía y homotopía*

De acuerdo con la expresión matemática del movimiento ondulatorio de una partícula elemental, tenemos que la posibilidad de que el corpúsculo se encuentre en un punto en un cierto instante está determinada por la intensidad de dicho movimiento, o sea, por el cuadrado de la amplitud de su onda. De este modo, parece posible considerar que la partícula elemental es un proceso periódico extendido en el espacio, que es la onda, y a la vez concentrado en un punto, que es el corpúsculo. Pues bien, por virtud del principio de exclusión de Pauli,[35] tenemos que dos partículas integrantes de un mismo sistema jamás pueden tener la misma energía y la misma cantidad de movimiento.[36] Entonces, en este sentido, cada partícula elemental llena por sí sola todo el sistema al cual pertenece y, por ende, tiene simultáneamente una multitud de localizaciones espaciales diferentes. Esta propiedad de ocupar muchos lugares al mismo tiempo es la *politopía* de la partícula elemental. Como se advierte claramente, se trata de una propiedad que no solamente se encuentra fuera del "sentido común", sino que es completamente diferente a la propiedad de *monotopía* que tienen las partículas en la física clásica, ya que éstas poseen una localización espacial única en cada instante. Por otra parte, como la politopía es una propiedad común a todas y cada una de las partículas elementales, resulta que éstas tienen también la propiedad de la *homotopía* respecto a cualquier lugar comprendido dentro del sistema al que

[35] W. Pauli, *Zeits. f. Physik, 31,* 1925. p. 765.

[36] Esta teoría, que se refiere a los leptones y los bariones, llamados conjuntamente fermiones, es aplicable a los gases formados por electrones y ha permitido interpretar las propiedades electrónicas y térmicas de los metales.

pertenecen, puesto que cada lugar es ocupado simultáneamente por todas ellas. Aquí volvemos a quedar fuera del "sentido común" y de la física clásica; porque las partículas que estamos más acostumbrados a tratar tienen la propiedad contraria, la *heterotopía,* debido a que un mismo lugar nunca puede ser ocupado por más de una partícula en el mismo instante.

En el seno de un sistema de partículas elementales, cada una de ellas se encuentra extendida de manera continua y reacciona constantemente con las otras. En virtud de su politopía, una partícula localizada corpuscularmente en un punto cualquiera del sistema, impide que cualquier otra partícula del propio sistema tenga el mismo estado cuántico que ella. Esta probabilidad de que la presencia de cada partícula se manifieste simultáneamente en muchos puntos del espacio, debido tanto al principio de exclusión como a la amplitud de su onda, termina con la noción del espacio vacío en el dominio microcósmico. Esto se antoja paradójico, hasta cierto punto, puesto que el sistema puede suponerse tan grande como se quiera y, en consecuencia, las partículas pueden estar todo lo alejadas que se quiera. Pero lo que sucede justamente es que esta localización múltiple de las partículas elementales, su politopía, hace que se desvanezca el sentido de la lejanía o de la cercanía. Por lo demás, esta indiferencia respecto a la variación de la distancia, ya se destaca con plena claridad en cualquier geometría que no sea métrica. Entonces, podemos inferir que no existen partículas elementales aisladas o libres; porque, incluso cuando las partículas se encuentran alejadas a distancias considerables, siguen conectadas con el sistema al cual pertenecen. Y este enlace indisoluble entre la partícula elemental y su medio, también se destaca con claridad dentro de los tres distintos aparatos teóricos de la mecánica cuántica.

Por otra parte, tenemos la consideración de la energía que vincula a los átomos de un mismo elemento químico dentro de la molécula; como ocurre por ejemplo y como caso más simple, en la molécula diatómica del hidrógeno.

Esta energía se produce mediante el intercambio de los dos electrones, uno de cada átomo, y por ello se denomina energía de intercambio.[37] Dicha energía desempeña una función importante en las interacciones de los átomos que se encuentran próximos dentro de una molécula, lo mismo que en las celosías que constituyen los cristales y, posiblemente, también en las acciones recíprocas entre las partículas elementales que integran los núcleos atómicos.[38] La energía de intercambio solamente surge cuando dos partículas de tipo idéntico tienen una cierta probabilidad que no sea nula, de encontrarse en el mismo lugar del espacio en el mismo instante. Lo cual significa que únicamente existe energía de intercambio cuando dos partículas elementales de la misma especie tienen dominios de presencia posible tales que encajen el uno en el otro, o sea, cuando se manifiesta entre ellas la propiedad de la homotopía. Por lo demás, esta posibilidad de que varias partículas elementales ocupen el mismo lugar al mismo tiempo, está vinculada también con el problema de la carencia de individualidad que exhiben las propias partículas elementales y, por consiguiente, con la cuestión de la imposibilidad de identificar completamente a una de ellas entre las otras partículas elementales del mismo tipo. Por lo tanto, cuando se hacen dos observaciones distintas y en cada una de ellas se manifiesta la existencia de un electrón, por ejemplo, es enteramente imposible saber si se trata de dos manifestaciones de una misma partícula o de sendas manifestaciones de dos electrones diferentes.

En el enfoque de la mecánica ondulatoria, la partícula elemental está representada por una onda compleja definida por cierta descomposición espectral y cuya amplitud está distribuida en cada instante de manera determinada

[37] W. Heitler, *Elementary Wave Mechanics,* Oxford, Clarendon Press, 1945. Véase la Sección 38.

[38] Con arreglo a la mecánica cuántica, cuando se estudia la evolución dinámica de un sistema que contiene partículas del mismo tipo se advierte que, al lado de los términos que expresan la existencia de las interacciones conocidas entre las partículas, aparecen otros términos que se interpretan como representativos de esta energía de intercambio, que constituye el vínculo aglutinante de las partículas homopolares.

en el espacio. Como ya lo acabamos de expresar, el corpúsculo puede manifestar su presencia en un punto cualquiera de la región ocupada por la onda, con una probabilidad que es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda en ese punto. A la vez, a cada componente monocromática que figura en la descomposición espectral de la onda, le corresponde un valor posible de la cantidad de movimiento del corpúsculo. Cuando se trata de una onda simple, monocromática, el corpúsculo respectivo tiene una cantidad de movimiento perfectamente bien determinada. Pero entonces la onda tiene una extensión indefinida en el espacio y en todos los puntos posee la misma amplitud. Por lo tanto, la posición del corpúsculo se hace indeterminada, ya que tiene la misma probabilidad de encontrarse en cualquiera de los puntos de la región espacial ocupada por la onda y, por consiguiente, se muestra con una politopía homogénea. En cambio, cuando la onda ocupa una región sumamente pequeña del espacio, fuera de la cual su amplitud es nula —es decir, cuando se trata de una onda puntual— entonces la posición del corpúsculo queda muy bien determinada. Sólo que, en tal caso, tenemos que dicha onda puntual es la resultante de la superposición de ondas monocromáticas de todas las longitudes de onda posibles. Por lo tanto, así son posibles todos los valores para la cantidad de movimiento de la partícula y, por ende, su magnitud queda indeterminada. En consecuencia, cuando hay certidumbre acerca de la posición, existe completa incertidumbre sobre la cantidad de movimiento, y viceversa. En otras palabras, tenemos que la precisión en la localización de una partícula es un resultado de la superposición de muchas ondas y, por ello, trae aparejada la coincidencia en la homotopía de muchas partículas. Mientras que la precisión en la cantidad de movimiento de una partícula elemental, es un resultado de su politopía homogénea, la cual se produce en el caso de que constituya una onda simple.

14. *Reflexión especular*

La simetría de una figura con respecto a un plano produce una forma antisimétrica de ella, es decir, otra figura con todos sus elementos enteramente iguales a los de la primera, pero ordenados justamente a la inversa, de tal manera que no es posible superponer una con otra. El ejemplo que tenemos más cerca es nada menos que el de nuestras propias manos, la izquierda y la derecha, las cuales pueden ser idénticas en todo y por todo, salvo que se trata de formas opuestas o inversas y, por ello, no podemos superponerlas, ni tampoco podemos lograr que se conviertan mutuamente una en otra, por más que cambiemos su posición de todas las maneras posibles. En cambio, cuando obtenemos la imagen de una mano izquierda en un espejo, observamos que se transforma en una mano derecha; y, a la recíproca, la imagen especular de una mano derecha es una mano izquierda. Por eso es que este tipo de transformación se denomina reflexión especular. Semejante disposición antisimétrica se muestra también notablemente entre otras partes de nuestro cuerpo. Del mismo modo, dos trompos que giran en sentidos opuestos tienen movimientos antisimétricos. Por analogía con nuestras manos, por ejemplo, se considera que la rotación de la Tierra, con su eje orientado de Sur a Norte y su giro de Poniente a Oriente, es un movimiento hacia la izquierda; mientras que un giro en sentido contrario representa una rotación hacia la derecha. Así se establece una distinción entre la izquierda y la derecha, a la vez que se considera una equivalencia completa entre ellas. Con base en esta equivalencia se formuló el principio general de que el comportamiento de los procesos existentes no se altera cuando se intercambia lo derecho con lo izquierdo; y, por ende, el descubrimiento de alguna cualidad en los objetos orientados hacia la izquierda, o hacia la derecha, permitía anticipar la existencia de la misma cualidad en los objetos orientados en sentido opuesto.

Sin embargo, la antisimetría observada realmente en la organización general y el comportamiento de los procesos existentes, no muestra esa equivalencia de una manera tan completa. Desde luego, el lado derecho del cuerpo humano no corresponde con exactitud al lado izquierdo, ni respecto a su anatomía ni tampoco fisiológicamente. Y lo mismo pasa con las simetrías bilaterales, cilíndricas y esféricas que existen en los otros organismos vivos, por más aproximadas que sean. También tenemos que en muchos compuestos orgánicos, como por ejemplo en los del carbono, resulta que sus moléculas se presentan en la naturaleza en una sola de sus formas, ya sea la levógira o la dextrógira.[39] Por otra parte, se ha comprobado que en los organismos vivos predomina un sentido sobre el otro, tanto en la estructura molecular de las sustancias que lo constituyen como en la de las que asimila. Así, por ejemplo, el organismo humano está constituido por la forma dextrógira de la glucosa y por la forma levógira de la fructosa.[40] En consecuencia, se observa una diferencia intrínseca entre la izquierda y la derecha, o sea, entre lo diestro y lo siniestro, por lo menos en lo que se refiere a la constitución y el comportamiento de los procesos químicos y biológicos. No obstante, esa asimetría relativa observada en la antisimetría entre la izquierda y la derecha ha sido atribuida, por lo general, a una asimetría accidental en el medio o en las condiciones de las cuales surgió la vida en la Tierra. Por lo tanto, se ha mantenido la interpretación de que existe una equivalencia en la antisimetría de lo izquierdo y lo derecho, a pesar de las divergencias asimétricas reconocidas.

[39] Como es sabido, fue Pasteur quien descubrió este importante hecho. En 1848, al recristalizar el ácido racémico, que es ópticamente inactivo, logró producir el ácido tartárico dextrógiro, que se presenta en la fermentación de la uva, junto con el ácido tartárico levógiro que sólo se forma artificialmente.

[40] Una tremenda consecuencia de esta asimetría es, por ejemplo, la enfermedad denominada fenilcetonuria, que provoca demencia, la cual es contraída al ingerir una pequeña cantidad de fenilalanina levógira. En contraste con eso, la forma dextrógira de la misma sustancia no produce tales efectos.

En los procesos físicos, las simetrías espaciales corresponden a la conservación de ciertas magnitudes. De esta manera, la simetría de la translación, que representa la homogeneidad del espacio, corresponde a la ley de conservación de la cantidad de movimiento linear. Análogamente, la simetría de la rotación, que representa la isotropía del espacio, se encuentra vinculada con la ley de conservación de la cantidad de movimiento angular. Y, del mismo modo, la simetría de la reflexión especular, que representa la invariancia ante la inversión espacial, está ligada con la ley de conservación de la paridad. Esta invariancia significa que las propiedades físicas de los procesos no cambian cuando se invierten sus coordenadas, o sea, cuando x se convierte en x, y en y, y z en $-z$. Como es fácil demostrar, la conservación antes dicha se cumple satisfactoriamente en los dominios macrocósmico y mesocósmico. Por lo tanto, se cumplen también la invariancia ante la reflexión especular y la simetría entre la izquierda y la derecha. En lo que respecta al dominio microcósmico, Laporte estableció la ley de conservación de la paridad, como consecuencia del descubrimiento de que los niveles de energía en los átomos complejos, pueden ser clasificados en niveles pares y niveles impares.[41] Luego, Wigner demostró que el cumplimiento de la ley de paridad es una consecuencia de la invariancia ante la reflexión de las fuerzas electromagnéticas del átomo.[42] Después, esta noción de la simetría entre la izquierda y la derecha se extendió a los otros campos de la física cuántica, a medida que su dominio se fue ampliando a las reacciones nucleares, las desintegraciones de las partículas elementales; las interacciones mesónicas y las fuerzas que originan la formación de hiperones, o sea, de las partículas elementales más pesadas. Como consecuencia de esto, la conservación de la paridad adquirió una importancia

[41] O. Laporte, "Die Struktur des Eisenspektrums", *Zeitschrift für Physik*, *23*, 1924, pp. 135-175.

[42] E. P. Wigner, "Einige Folgerungen aus der Schroedingerschen Theorie für die Termstrukturen", *Proc. Am. Phil. Soc.*, *43*, 1927, pp. 624-652.

fundamental en el dominio microcósmico. Utilizando un lenguaje figurado, podemos decir que las partículas elementales son como esferas pequeñísimas en rotación constante, unas en un sentido y las otras en el opuesto. Pues bien, de acuerdo con el principio de conservación de la paridad, las partículas que giran en sentidos opuestos se comportan de manera enteramente equivalente y tienen las mismas propiedades en forma respectivamente inversa. Por lo tanto, entre otras cosas, la transmutación de una partícula elemental es equivalente a la transmutación de su correspondiente antipartícula; por lo cual, las partículas resultantes de dicha transmutación son pares e impares, izquierdas y derechas, en la misma proporción.

Sin embargo, en el campo de las interacciones débiles y, particularmente, en el caso de las transmutaciones entre el mesón *kappa* positivo y los mesones *pi,* se fueron acumulando varios indicios que acabaron por hacer surgir la posibilidad de que la invariancia ante la reflexión no tuviese un cumplimiento universal. Ante esa situación, Lee Tsung-dao y Yang Chen-ning se propusieron resolver la cuestión, planteando la necesidad de realizar experimentos decisivos, basados en la construcción de dos dispositivos que fuesen mutuamente inversos.[43] Dichos experimentos pudieron ser ejecutados bajo la dirección de Wu Chien-shiung,[44] utilizando núcleos radiactivos del isótopo del cobalto de peso atómico 60, que tienen un espín de 5 unidades. En esos experimentos se encontró una notable diferencia en los procesos de desintegración que ocurren en

[43] Yang y Lee, "Question of Parity Conservation in Weak Interactions", *Phys. Rev., 104,* 1956, pp. 254-258. Una exposición detallada se tiene en Yang, *Law of parity conservation and the other symmetry laws,* y Lee, *Weak interactions and nonconservation of parity,* que fueron los discursos que pronunciaron en Estocolmo, el 11 de diciembre de 1957, al recibir el Premio Nobel de Física. La traducción española de ambos discursos se encuentra en *Simetría y Paridad,* México, U.N.A.M., Suplementos del Seminario de Problemas Científicos y Filosóficos, Segunda Serie, Núm. 11, 1958.

[44] Wu C. S., E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoppes y R. P. Hudson, "Experimental Test of Parity Conservation in Beta-Decay", *Physical Review, 105,* 1957, pp. 1413-1415.

los dos aparatos inversos, con una marcada preferencia por la orientación opuesta de los electrones resultantes. Como consecuencia, se tuvo la prueba de que estos procesos no son invariantes ante la reflexión especular y, por lo tanto, de que en ellos no se conserva la paridad. También se comprobó en esos mismos experimentos, que tampoco se cumple la invariancia ante la conjugación de la carga, cosa que se puso de manifiesto en el gran número de casos observados de asimetría angular. Con fundamento en estos resultados y otros similares, Lee, Yang, Salam y Landau han propuesto la "teoría de los dos componentes del neutrino".[45] Conforme a tal hipótesis, existe una asimetría entre la helicidad del neutrino y la del antineutrino que son emitidos simultáneamente con la pareja negatrón-positrón, en el proceso de desintegración *beta.* Por consiguiente, el espín del neutrino siempre será derecho con respecto a la dirección de propagación, mientras que el espín del antineutrino será izquierdo. Además, esto implica que no existen partículas que fuesen como la imagen especular del neutrino, ni tampoco tienen realidad objetiva las partículas inversas del antineutrino.

El incumplimiento de la invariancia ante la reflexión especular plantea, indudablemente, la necesidad de practicar un examen penetrante y de conjunto. Desde luego, habrá que dilucidar si el descubrimiento de Lee y Yang implica la existencia de una verdadera asimetría espacial entre la izquierda y la derecha, en el nivel microcósmico. Y, si tal es el caso, habrá que indagar hasta qué punto puede afectar también a las teorías físicas establecidas para explicar los otros dominios de la existencia. Igualmente sería posible llegar a la conclusión de que sólo se requiere encontrar una nueva relación de transformación para la reflexión en el espacio, que exprese con profundidad la naturaleza de la simetría bilateral y, por lo tanto, de la

[45] Lee T. D. y Yang C. N., "Parity Nonconservation and a Two-Component Theory of the Neutrino", *Physical Review, 105,* 1957, pp. 1671-1675; A. Salam, "On Parity Conservation and Neutrino Mass", *Nuovo Cimento, 5,* 1957, p. 299; L. Landau, "On the Conservation Law of Weak Interactions", *Nuclear Physics, 3,* 1957, pp. 127-131.

antisimetría entre la izquierda y la derecha. En este sentido, Landau ha propuesto la hipótesis de la "inversión combinada", considerando que la inversión espacial y la conjugación de la carga ocurren simultáneamente; con lo cual la asimetría quedaría confinada a las cargas eléctricas, en tanto que el espacio seguiría siendo completamente simétrico.[46] Otra posibilidad sería la de encontrar que el espacio microcósmico careciera localmente de sentido,[47] es decir, que para regiones pequeñas del espacio, del orden de magnitud de 10^{-17} cm, no fuera posible establecer los dos sentidos opuestos de cada dirección espacial definida.[48] En tal caso, en esas regiones del espacio no existiría la reflexión especular y tampoco tendría significado la invariancia correspondiente.[49] En fin, la tercera posibilidad sería la de tener que modificar radicalmente nuestra concepción del espacio, introduciendo la asimetría como una de sus propiedades fundamentales. Lo cual sería tanto como establecer una nueva geometría, basada en los conocimientos que ya se tienen sobre los procesos asimétricos en la física, la química y la biología.

15. *Geometría discontinua*

De acuerdo con las consideraciones que hemos hecho hasta aquí, se puede afirmar que el conocimiento científico adquirido sobre los procesos físicos microcósmicos, ha puesto en crisis tanto la concepción clásica del espacio como su concepción relativista. En buena parte, la insuficiencia

[46] L. Landau, *op. cit.*

[47] Marcos Moshinsky, *Espacio, tiempo y paridad,* México, U.N.A.M., Cuadernos del Seminario de Problemas Científicos y Filosóficos, Segunda Serie, Núm. 9, 1958.

[48] Tal como se hace en la geometría de los puntos al infinito, que son definidos por todas las direcciones posibles de las rectas paralelas, pero con la circunstancia de que solamente hay un punto en cada dirección.

[49] La carencia de los dos sentidos en un espacio, no es un concepto particularmente extraño en la geometría topológica. Así, por ejemplo, aun cuando lo más frecuente es que una superficie tenga dos caras y, por ende, dos sentidos para su normal, sin embargo, la banda de Moebius tiene únicamente una cara.

mostrada por las interpretaciones clásica y relativista del espacio, se debe al carácter rígidamente continuo de los marcos que ambas ofrecen para la representación espacial de los procesos microcósmicos. En todo caso, ninguno de esos dos marcos resulta enteramente adecuado para la representación de los procesos en el nivel microcósmico.[50] De ahí que sé suscite la cuestión de explorar las posibilidades de que el marco necesario para la representación de las propiedades espaciales de los procesos microcósmicos, pueda ser expresado por alguno de los tipos de geometría que ya se encuentran desarrollados matemáticamente. Pero no es difícil concluir que no resulta aplicable la geometría métrica, ni tampoco la homotésica, la afín o la proyectiva. Y, lo que es más, ni siquiera la geometría más general que se ha formulado, la topología, parece ofrecer la estructura necesaria para la representación espacial de los procesos microcósmicos. Porque, como se sabe, la topología se ocupa justamente de las transformaciones que son reversibles, biunívocas y continuas; y lo que se requiere es un aparato matemático que permita el tratamiento de las transformaciones discontinuas. Entonces, tomando en cuenta que las propiedades topológicas son invariantes a toda suerte de distorsiones, con excepción de la ruptura,[51] cabe preguntar si será indispensable la construcción de una geometría todavía más general, en la cual se pudiera "romper" el espacio sin perjuicio de que se mantuvieran invariantes algunas de sus propiedades. Esto es, dicho con mayor precisión, *¿será menester el establecimiento de una geometría que estudie las transformaciones discontinuas?*

Desde luego, el abandono de la continuidad geométrica implica la consideración de un espacio discreto caracterizado por un *cuanto de longitud,* o sea, por una

[50] L. de Broglie, "L'espace et le temps dans la physique quantique". *Proceedings of the Tenth International Congress of Philosophy,* Amsterdam, North-Holland Publishing Co., 1949, vol. I, p. 814.

[51] F. Klein, *Elementary mathematics from an advanced standpoint: Geometry,* Nueva York, Macmillan, 1939, pp. 105-109.

dimensión mínima fundamental.[52] Como valor de esta dosis mínima de la extensión espacial, se ha propuesto el orden de magnitud de 10^{-14} cm, que corresponde a las dimensiones de los núcleos atómicos y de las partículas elementales, lo mismo que a las longitudes de onda de las propias partículas, a las distancias que resultan en la mayor parte de sus interacciones y al radio de acción de las fuerzas nucleares. Además, se ha comprobado que, cuando dos partículas elementales se encuentran separadas por una distancia menor que dicho cuanto de longitud, entonces es imposible distinguirlas por medio de experimentos de difracción. Por lo tanto, esa longitud mínima expresa los límites espaciales de la localización de las interacciones de las partículas elementales. Sin embargo, dicho cuanto de longitud solamente caracteriza el nivel de las interacciones discretas de las partículas elementales. Es posible que en el nivel de los componentes de dichas particulas, los *quarks*, cuyo estudio se ha iniciado en los últimos años, se tenga que fijar un cuanto de longitud todavía más pequeño, del orden de magnitud de 10^{-50} a 10^{-100} cm. Por otra parte, como ya lo hemos indicado, en el nivel correspondiente a la estructura interna del átomo, el cuanto de longitud tiene que referirse a las distancias existentes entre las diversas órbitas cuánticas y el núcleo atómico, cuyo orden de magnitud es de 10^{-8} cm. Por lo tanto, no se debe descartar la posibilidad de que haya diferentes cuantos de longitud para esos tres distintos niveles microcósmicos de la existencia.

La formulación de la geometría discontinua requiere de una elaboración matemática bien difícil. Desde luego, habría necesidad de transformar todas las ecuaciones diferenciales de la geometría continua en ecuaciones de diferencias finitas, cuya solución presenta todavía muchos obstáculos no superados, no obstante los avances que se han logrado con el estudio de las funciones analíticas de variable compleja. Sin embargo, la posibilidad de construir una geometría de este tipo fue advertida ya por

[52] W. Heisenberg, *Zeits. f. Physik, 110,* 1938, p. 251.

Riemann.[53] Por otro lado, Veblen y Bussey [54] exploraron concretamente la posibilidad de formular una geometría finita de la estructura discreta del espacio y, por su parte, Silberstein [55] estudió la posibilidad de sustituir el tensor fundamental del espacio-tiempo relativista, por un sistema de encadenamientos en conexión con un conjunto discreto. Pero, lo cierto es que todavía falta mucho camino por recorrer, antes de que se pueda establecer realmente la geometría discontinua que se necesita. Con todo, es de esperar que en un lapso no muy prolongado, los matemáticos consigan resolver las dificultades y desarrollen esa nueva disciplina. Igualmente, no puede caber duda de que encontrarán después la correspondencia rigurosa entre la geometría discontinua y las geometrías continuas. Mientras tanto, los físicos tendrán que seguir recurriendo a la geometría continua, haciendo un tratamiento estadístico de las longitudes cuánticas, a sabiendas de que el espacio microcósmico tiene características discontinuas.

16. *Espacio microcósmico*

Con base en lo anteriormente expuesto, podemos presentar las modalidades que asume la categoría de espacio en la física microcósmica. Desde luego, tenemos confirmado el hecho de que la relación espacial es una de las formas primordiales en que se manifiesta la concatenación existente entre los procesos microcósmicos. Y esta concatenación permite advertir con gran claridad que el espacio es el conjunto de las propiedades espaciales que son inherentes a los procesos microcósmicos y representan una forma de su existencia. Por lo tanto, los procesos microcósmicos no existen en el espacio, sino que su existencia es espacial. Más aún, el carácter común que tienen las propiedades espaciales exhibe de manera definida la pertenencia inex-

[53] B. Riemann, *Gesammelte mathematische Werke*, Leipzig, segunda edición, 1892, p. 286.

[54] O. Veblen y W. H. Bussey, *Trans. Am. Math. Soc.*, 7, 1906, p. 241.

[55] L. Silberstein, *The Theory of Relativity*, Londres, 1924, p. 362.

tinguible de cada partícula elemental a su medio y, por consiguiente, la conexión que existe entre todas las partículas y la totalidad de sus localizaciones espaciales. Por otra parte, esa conexión espacial se manifiesta de un modo rigurosamente tridimensional, por lo cual resulta indudable que el espacio microcósmico tiene tres dimensiones y sólo tres dimensiones. Además, se mantiene la simetría de las translaciones y las rotaciones espaciales, de tal manera que el espacio microcósmico es homogéneo, isotrópico y congruente, o sea, que las propiedades espaciales de los procesos se conservan en cualquier lugar, para todas las direcciones y en todos sus desplazamientos. En cambio, la refutación del principio de conservación de la paridad indica la existencia de una asimetría espacial respecto a la transformación de lo izquierdo en derecho, de lo cual resulta que el espacio no es invariante ante la reflexión especular.

Por otro lado, tenemos que el espacio microcósmico posee dos aspectos distintos pero no diferentes, que son la extensión y la cantidad de movimiento; de tal manera que, tomándolos conjuntamente, se forma la magnitud unitaria espacio-cantidad de movimiento. En consecuencia, entre esos dos aspectos existe la relación expresada por el siguiente juicio: Respecto a las partículas elementales, la existencia espacial se puede manifestar como extensión, como cantidad de movimiento o, simultáneamente, como extensión y cantidad de movimiento. En otro sentido, el espacio microcósmico se muestra como existencia continua, en un conjunto simple e inseparable; pero, al propio tiempo, pone de manifiesto su discontinuidad y su estructura cuántica. La continuidad se exhibe acentuadamente en el movimiento ondulatorio de las partículas elementales y, por ende, en su extensión y su oscilación; mientras que las discontinuidad corresponde notablemente al corpúsculo y, por consiguiente, a la cantidad de movimiento y la energía de las mismas partículas. Sin embargo, existe una transposición constante de estos aspectos contradictorios, de manera tal que la extensión y la oscilación mues-

tran su carácter discontinuo, en tanto que la energía y la cantidad de movimiento exhiben su continuidad. En el interior del átomo, el espacio muestra su naturaleza cuántica, tanto en las distancias que median entre el núcleo y las órbitas electrónicas, como en las longitudes de las propias trayectorias orbitales. Y esta cuantización espacial se encuentra en mutua dependencia con la cuantización de la cantidad de movimiento, de la energía y del tiempo. A la vez, las trayectorias electrónicas son lugares geométricos continuos, que se encuentran separados por extensiones espaciales discretas. En esas trayectorias, la coincidencia exacta entre su longitud y el número entero de oscilaciones ondulatorias, constituye una conjugación de la discontinuidad y la continuidad del espacio. Y, por lo demás, el enlace entre las órbitas cuánticas se establece por el intercambio de la energía, que es absorbida o emitida según el sentido del cambio; con lo cual se superan las soluciones de continuidad representadas por los trozos finitos que separan espacialmente unas órbitas de otras.

En sus movimientos incesantes, las partículas elementales se muestran siguiendo trayectorias corpusculares que son espacialmente discontinuas y temporalmente intermitentes. En cambio, en el aspecto ondulatorio de su movimiento, las propias partículas elementales se manifiestan de manera continua y persistente, tanto espacial como temporalmente. A más de esto, la interacción de las partículas elementales constituye el enlace indisoluble de continuidad entre todas ellas. Por otra parte, la conexión universal entre todos los lugares del espacio microcósmico, se muestra del modo más acusado en las peculiares propiedades de la homotopía y la politopía que tienen las partículas elementales. En virtud de tales propiedades, una misma partícula ocupa simultáneamente una multitud de lugares y, a la vez, en cada lugar se manifiesta la presencia de muchas partículas en el mismo instante. Igualmente, en el nivel microcósmico se muestra de muchas maneras la conexión recíproca entre el espacio y el tiempo, cuya conjugación indisoluble hace que los cambios espaciales pro-

duzcan necesariamente cambios temporales, y viceversa. En fin, la consideración de la estructura discreta del espacio microcósmico parece imponer la determinación del cuanto de longitud, o sea, de una extensión espacial mínima para que puedan manifestarse las propiedades de los procesos microfísicos. Y, lo que es más, es posible que la magnitud de ese cuanto de longitud tenga que ser diferente en los distintos niveles microcósmicos de la existencia. Como consecuencia, se plantea también con urgencia la necesidad de formular una geometría de las transformaciones discontinuas, en la cual se puedan representar con todo el rigor matemático las propiedades espaciales de los procesos microcósmicos.

ING. ADAN RAMOS BAUTISTA
UNAM
GEOTECNIA
CAMPUS ACATLAN

III

LA CATEGORÍA DE TIEMPO

17. *Noción del tiempo*

El tiempo, al igual que el espacio, es una propiedad común a todos los procesos existentes. La relación temporal es la forma elemental en la cual se expresa el desarrollo de todos y cada uno de los procesos del universo. A través de su relación temporal se manifiesta la duración de cada proceso, la sucesión de sus cambios y el ritmo en que se efectúan. Esta misma ordenación nos hace ver con claridad que el tiempo no es algo independiente de los procesos, ni tampoco es un flujo exterior en el cual transcurriesen éstos. En rigor, el tiempo es sencillamente el conjunto de las propiedades temporales contenidas en los procesos y que les son inherentes como modalidades de su existencia. Por lo tanto, hablando estrictamente, los procesos no existen en el tiempo, sino que su existencia es temporal. A la vez, el carácter común que tienen las propiedades temporales señala, definidamente, la coexistencia de los diversos procesos y la vinculación recíproca entre ellos. Los cambios y transformaciones que ocurren en las cualidades de los procesos se consideran, analógicamente, como propiedades temporales. Igualmente, el surgimiento y la desaparición de los procesos son tenidos también como propiedades temporales. Por ello se dice que las cualidades surgen en el tiempo, aún cuando lo que ocurre, rigurosamente, es que el tiempo mismo es la nueva cualidad manifestada cuando surge. Así, la novedad de la cualidad, su desemejanza, es el tiempo. De una manera más profunda aún, el tiempo y el espacio son formas fundamentales de la existencia, que se encuentran vinculadas indisolublemente. El espacio es la totalidad de las manifestaciones objetivas del universo en una multitud de ordenaciones coexistentes. En tanto que el tiempo es ese mismo

conjunto total de las manifestaciones de la existencia, solo que incluido en un orden único en el cual los procesos son covariantes.

El tiempo, como conjunto de las propiedades temporales de los procesos existentes, es un conjunto único y continuo; pero, a la vez, es discontinuo, posee estructura atómica y es divisible infinitamente. Por otra parte, el tiempo también es infinito en su aspecto de duración, lo cual significa que no ha tenido principio ni tampoco tendrá término. En consecuencia, el tiempo es un conjunto formado por una multitud infinita de lapsos finitos. Por otro lado, el tiempo tiene una dimensión y sólo una dimensión. En virtud de esta monodimensionalidad, el tiempo queda completamente definido por una coordenada única. Así, la posición de un proceso en el continuo espacio-tiempo relativista, queda definida de manera necesaria y suficiente por tres coordenadas espaciales y una sola coordenada temporal. Pero es indispensable que no se confunda la dimensión temporal única con alguna de las tres dimensiones espaciales y, en consecuencia, tanto éstas como aquélla deben ser consideradas con sus características propias, sin perjuicio de que se mantenga su vinculación indisoluble. Además, en la variación de las coordenadas espaciales y temporales, que se produce con el movimiento, es necesario tomar en cuenta la influencia que los cambios temporales ejercen sobre las manifestaciones del espacio; y, a la vez, la influencia que los cambios espaciales tienen recíprocamente sobre el curso del tiempo. Otra propiedad específica del tiempo, la irreversibilidad de su curso, significa que el tiempo fluye en una dirección simple y en un sentido único dentro de esa dirección. Por consiguiente, en el curso del tiempo distinguimos el pasado, el presente y el futuro, dentro de su desenvolvimiento en una sucesión definida y en un orden que no es intercambiable.[1]

La comprobación de la invariancia de la velocidad de la luz y su carácter peculiar de ser la máxima velocidad

[1] G. A. Kursanov, "Espacio y tiempo...".

a que se transmite la energía, pusieron de manifiesto que dos acontecimientos sólo pueden ser considerados como simultáneos cuando ocurren en posiciones espaciales contiguas. Así se destruyó la separación absoluta que antes se hacía entre el espacio y el tiempo. Y, en particular, dentro del tiempo mismo, se superó la separación absoluta con que se distinguía el pasado del futuro, a través de un presente instantáneo. Antes se decía que un proceso había pasado cuando era posible ponerlo así de manifiesto experimentalmente; en cambio, se llamaba futuro al proceso en cuyo transcurso todavía no se podía intervenir, ya que se le tenía como mera posibilidad; y el presente venía a ser el instante infinitamente breve que separaba contradictoriamente al futuro del pasado. Se tenía, por lo tanto, la consideración de dos propiedades temporales contradictorias en un mismo instante, el presente, en el cual tampoco se cumplía, por otra parte, la exclusión de tercero. Pues bien, lo que ahora se ha venido a comprobar experimental y teóricamente, es que el presente es un intervalo pequeño pero finito, cuya duración depende de la distancia a la cual se encuentre el observador que trate de diferenciar entre pasado y futuro, del lugar en el cual ocurren los procesos cuyo transcurso se observa. O sea, que el presente es el aspecto del tiempo en donde los procesos acontecidos no son pasados ni futuros. Y, también, es en el presente en donde se acusa la característica temporal de que los procesos acontecidos sean simultáneamente pasados y futuros.[2]

Entonces, de acuerdo con la física relativista, un proceso que ya ha acontecido con respecto a cierta posición espacial, apenas estará aconteciendo en presente para otra posición espacial diferente y, aún más, todavía estará por acontecer en el futuro respecto a otra posición espacial distinta de las dos anteriores. Esta característica del tiempo es una consecuencia de la velocidad finita a la cual se

[2] W. Heisenberg, "La transformación de los principios de la ciencia natural exacta", *Revista de Occidente*, Madrid, *12*, Núm. 138, 1934, pp. 277-301.

transmite la energía; o sea, dicho de otra manera, del hecho bien comprobado de que en el universo no existen acciones a distancia, ni tampoco acciones instantáneas. Pero esa superposición del pasado con el presente y el futuro no implica ninguna alteración del orden temporal, con respecto a cada posición espacial determinada. En rigor, lo que se muestra en tal coincidencia de momentos temporales distintos, es justamente esa característica que ya hemos señalado como propiedad del espacio, la de constituir una serie infinita de ordenaciones distintas pero coexistentes. Además, para que esta superposición temporal se manifieste, es indispensable que las posiciones espaciales consideradas se encuentren separadas por distancias astronómicas, cuyo recorrido a la velocidad de la luz implique un transcurso considerable de tiempo. Por lo tanto, para los procesos que acontecen en la Tierra, que es la región espacial en la cual está localizado nuestro mesocosmos, la superposición temporal no produce ninguna influencia apreciable. En consecuencia, la historia humana nunca puede regresar y volver a empezar. Porque la duración es el desarrollo eterno de la existencia universal en un sentido irreversible; aún cuando la simultaneidad temporal de ese desenvolvimiento no sea la misma con respecto a los procesos que acontecen, en relación con todas las posiciones espaciales. Por otra parte, en la imposibilidad de que el curso del tiempo cambie de sentido, se muestra igualmente que la duración infinita del universo es una forma fundamental de su existencia. Por último, tenemos que en el tiempo se cumple una ley de simetría, la homogeneidad de su translación. La homogeneidad del tiempo significa que sus propiedades se conservan en todos los instantes sin excepción. Por su parte, la congruencia del tiempo implica que es posible el desplazamiento temporal sin que se alteren las propiedades de los procesos transportados. Entonces, debido al carácter homogéneo y congruente del tiempo, resulta que la única manera de distinguir un intervalo temporal de otro es justamente a base de su relación con los intervalos de duración de los

procesos existentes. Y, por eso mismo, el intervalo temporal de un proceso cualquiera solamente se puede determinar con respecto a su vinculación con otro intervalo temporal. La invariancia ante la reflexión temporal representa otra ley de simetría, conforme a la cual las propiedades de un proceso desarrollado en un cierto orden temporal, serán enteramente equivalentes a las propiedades de otro proceso que se desarrolle en un orden temporal inverso. Pero tal invariancia se encuentra ahora en entredicho, como consecuencia de los experimentos que comprobaron el incumplimiento de la conservación de la paridad.[3] Por lo tanto, estamos colocados ante la posibilidad de que el tiempo microcósmico posea en este respecto una asimetría fundamental, de la cual hablaremos después.

18. *Conjugación de energía y tiempo*

Las relaciones de incertidumbre de Heisenberg no se aplican solamente a la posición espacial y la cantidad de movimiento, sino también a otra pareja de magnitudes conjugadas, que son la energía y el tiempo. Esto significa que la determinación simultánea de la energía y el tiempo de una partícula elemental, tiene un límite riguroso para su precisión. Es decir, que mientras más exactamente se determina el instante en que una partícula elemental se encuentra en un cierto lugar, más incierta resulta ser la determinación que se haga entonces de su energía; y, recíprocamente, mientras más precisa sea la determinación de la energía de una partícula elemental, menos exacta será la determinación del instante en que se encuentre en un lugar dado.[4] Sin embargo, también en este caso es completamente posible determinar la energía de una partícula elemental con el grado de precisión que se requiera; e,

[3] Véase la Sección 14.

[4] Entre la incertidumbre de la energía ΔE y la incertidumbre del tiempo Δt, se cumple la relación: $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$.

igualmente, es enteramente posible determinar el instante en que pasa por un lugar, con toda la precisión que se necesite.[5] Lo único que no se puede conseguir es determinar el tiempo y la energía de la misma partícula elemental, con una precisión infinita.[6] Desde el punto de vista lógico, tenemos que la relación simultánea entre los conceptos de "energía precisamente determinada" y de "instante precisamente determinado", para una y la misma partícula elemental, se expresa por medio de un juicio de incompatibilidad.[7] Por consiguiente, existen tres posibilidades: determinar con precisión la energía, en detrimento de la determinación precisa del tiempo; determinar con precisión el tiempo, a costa de la determinación precisa de la energía; y determinar la energía y el tiempo con la precisión permitida por el límite fijado por la relación de incertidumbre.

Pues bien, en la interpretación arbitraria que se hace con arreglo al llamado "principio de complementariedad", la relación de incertidumbre es convertida subjetivamente en una exclusión radical entre las dos primeras posibilidades que acabamos de señalar, con la consiguiente consideración absurda de que la tercera posibilidad es inexistente.[8] A la vez, la interpretación complementarista sostiene a todo trance los conceptos de energía y de tiempo establecidos en la física clásica, atribuyéndoles un carácter in-

[5] Esto es que, conforme a la propia relación de incertidumbre, cuando se determina la energía de una partícula elemental con toda la precisión requerida, esa determinación no perturba la magnitud de dicha energía y, por lo tanto, al medir inmediatamente después de nuevo la energía de la partícula, se encuentra exactamente el mismo valor anterior, si la partícula no ha sufrido otra perturbación. Lo que si habrá cambiado con la determinación de la energía, es el tiempo de la propia partícula elemental. Y lo mismo ocurre respecto al tiempo, que no se altera entre dos determinaciones sucesivas hechas con la mayor exactitud.

[6] El límite finito de la precisión está determinado con toda exactitud por el segundo miembro de la desigualdad, o sea, por: $\frac{h}{4\pi}$.

[7] Para la caracterización de este tipo de juicio, véase De Gortari, *Introducción a la lógica dialéctica*, pp. 149-153, 169-170, 173 y 175.

[8] Véase la Seccion 7.

mutable y absoluto,[9] para poder concluir luego que, como no es posible determinarlos separadamente y con ese carácter en los procesos microcósmicos, entonces no es posible conocer objetivamente las propiedades de las partículas elementales. De esta manera se intenta convertir a las propiedades fundamentales de la existencia en el nivel microcósmico, en categorías subjetivas y decididamente irracionales. Sin embargo, aún dejando a un lado la supuesta conversión complementarista, parece ser conceptualmente imposible determinar el tiempo y la energía de una partícula elemental en un mismo lugar, con una precisión que exceda el límite establecido por la relación de incertidumbre. Pero, por otro lado, si examinamos críticamente una de las ecuaciones primordiales de la mecánica cuántica, nos encontramos con que la energía E de una partícula elemental está determinada justamente por la constante cuántica universal h y la frecuencia de su movimiento ondulatorio ν, conforme a la relación: $E = h\nu$. Como es sabido, la frecuencia de un movimiento ondulatorio representa el número de crestas de la onda que pasan por un punto en una unidad de tiempo y, por consiguiente, la dimensión de la frecuencia es la del inverso del tiempo. Entonces, resulta que el cumplimiento de la ecuación impone la necesidad de considerar y operar simultáneamente con la energía y con una propiedad temporal, como lo es la frecuencia, de una y la misma partícula elemental. Más aún, la ecuación requiere ineludiblemente que se tomen valores precisos de ambas magnitudes; lo cual, de acuerdo con la relación de incertidumbre, es justamente imposible hacer con precisión res-

[9] En rigor, ni siquiera en la física clásica se puede sostener ahora la concepción del tiempo absoluto, en el sentido de ser independiente de las otras propiedades objetivas de los procesos, ya que eso exigiría la transmisión instantánea de señales, lo cual es imposible por el hecho de que no existen transmisiones instantáneas de energía. Tampoco se puede considerar actualmente la separación estricta de tiempo y energía en la física clásica. Y, en cuanto a la inmutabilidad de los conceptos científicos, basta señalar que el avance del conocimiento los enriquece constantemente y, por ende, los hace cambiar de continuo; y, por supuesto, tal cosa ocurre igualmente con los conceptos fundamentales que son las categorías.

pecto a la energía y el tiempo. Así se plantea una paradoja insostenible: por un lado, la imposibilidad de hacer la determinación precisa y simultánea de la energía y el tiempo; y, por otra parte, la necesidad imposible de esquivar, de hacer la determinación simultánea y precisa de la energía y la frecuencia, que es también una propiedad temporal. En consecuencia, tenemos que llegar a la conclusión de que *es conceptualmente posible y experimentalmente necesario* determinar a la vez, para una y la misma partícula elemental, la magnitud de su energía y de una de sus propiedades temporales.

La misma irreductibilidad de la oposición indicada impone claramente la urgencia de superar esa paradoja resolviéndola dialécticamente. En un sentido estricto, los propios términos en que se plantea la contradicción son los que nos permiten apuntar su solución. Para ello, tenemos que considerar a la energía de una partícula elemental como otra forma en la cual se manifiesta su frecuencia u oscilación ondulatoria, o sea, como una propiedad temporal. A la vez, tenemos que reconocer en la frecuencia de su movimiento ondulatorio, otra manera en la cual se muestra la energía de la partícula elemental. Por consiguiente, el tiempo tiene que ser considerado conjuntamente como energía y oscilación. En otras palabras, se tiene que reconocer a la energía y la frecuencia como dos formas, distintas pero inseparables, a través de las cuales se manifiesta ese modo fundamental de la existencia de las partículas elementales que constituye lo que llamamos sus propiedades temporales, o bien, de manera abreviada, el tiempo.[10] Por lo tanto, el tiempo comprende dos aspectos, que son la energía y la oscilación ondulatoria. Entonces, su relación lógica se puede expresar en función de un juicio de inclusión,[11] cuya formulación será como sigue: *Respecto a las partículas elementales, el tiempo se puede*

[10] Ya se ha demostrado antes, en el dominio de la teoría de la relatividad, esta conjugación entre el tiempo y la energía. Véase, A. Einstein, "Time, space and gravitation", *Science, 51,* 1920, p. 8

[11] Para la caracterización de este tipo de juicio, véase De Gortari, *Introducción a la lógica dialectica,* pp. 149-151, 169-170, 172 y 175.

manifestar como oscilación, o como energía, o bien, como oscilación y energía a la vez. De esta manera quedan satisfechas simultáneamente la relación de incertidumbre y la ecuación que conjuga la frecuencia del movimiento ondulatorio con la energía; lo cual resulta posible, entre otras razones, por la coincidencia de la constante cuántica h en dicha ecuación y en la desigualdad de Heisenberg.

19. *Localización y condiciones dinámicas*

Como ya lo hemos señalado antes,[12] las partículas elementales tienen dos aspectos contradictorios e indisolubles: su constitución corpuscular y su movimiento ondulatorio. El aspecto corpuscular está caracterizado por la energía y la cantidad de movimiento, en tanto que el aspecto ondulatorio lo está por la longitud de onda y la frecuencia. Y la conjugación indisoluble entre ambos aspectos se muestra en el hecho de que la energía y la frecuencia de las ondas son dos maneras diferentes en que se presentan las propiedades temporales,[13] mientras que la cantidad de movimiento y la longitud de onda son dos modos distintos en que se exhiben las propiedades espaciales.[14] Es más, dicha conjugación se encuentra determinada con precición en las ecuaciones fundamentales de la mecánica cuántica, que enlazan por parejas a las cuatro magnitudes en cuestión, dentro de las seis relaciones que son posibles entre ellas.[15] Así, en el doble vínculo de la energía con la cantidad de movimiento y de la frecuencia con la longitud de onda, tenemos en rigor una doble conexión entre el tiempo y el espacio. Por otro lado, la especificación del estado de movimiento de una partícula elemental, que implica la determinación de su energía y su cantidad de movimiento, se encuentra relacionada recíprocamente con el establecimiento de las condiciones de dicho movimiento,

[12] Véase la Sección 9.
[13] Véase la Sección 18.
[14] Véase la Sección 8.
[15] Véanse dichas relaciones en la Sección 8.

o sea, con su localización espacio-temporal. De este modo queda destacada, todavía más, la interdependencia múltiple que existe entre las diferentes modalidades del tiempo y el espacio en el dominio de las partículas elementales. El enlace entre la energía, el tiempo, el espacio y la cantidad de movimiento es tan íntimo, que la conservación de la energía de una partícula elemental se puede interpretar, indistintamente, como conservación de la frecuencia de su movimiento ondulatorio. Y, también, la conservación de la cantidad de movimiento se puede interpretar como conservación de la longitud de onda de la propia partícula elemental.

Entonces tenemos que la extensión y la cantidad de movimiento son dos aspectos diferentes, pero no distintos, del espacio microcósmico. Análogamente, el tiempo microcósmico tiene dos formas diferentes, pero no distintas, que son la oscilación y la energía. Pero, además, el espacio y el tiempo constituyen un conjunto único inseparable. De tal manera que, en resumidas cuentas, debemos considerar un solo conjunto unitario y continuo de extensión-cantidad de movimiento-energía-oscilación. Por consiguiente, se puede establecer el siguiente juicio complejo: *Respecto a las partículas elementales, la existencia objetiva se puede manifestar: 1) como extensión; 2) como cantidad de movimiento; 3) como energía; 4) como oscilación; 5) como extensión y cantidad de movimiento; 6) como extensión y energía; 7) como extensión y oscilación; 8) como cantidad de movimiento y energía; 9) como cantidad de movimiento y oscilación; 10) como energía y oscilación; 11) como extensión, cantidad de movimiento y energía a la vez; 12) como extensión, cantidad de movimiento y oscilación a la vez; 13) como extensión, energía y oscilación a la vez; 14) como cantidad de movimiento, energía y oscilación a la vez; y, 15) simultáneamente como extensión, cantidad de movimiento, energía y oscilación.* Esta síntesis estará caracterizada por el cumplimiento riguroso de los principios de conservación de la energía y la cantidad de movimiento. Por lo tanto, en la conjugación dialéctica de las

propiedades fundamentales de las partículas elementales, tendremos que éstas se manifestarán indistintamente por la conservación de su extensión, de su cantidad de movimiento, de su energía y de su oscilación y, a la vez, por la mutua transformación entre estas cuatro formas de su existencia. En todo caso, de manera destacada aunque no exclusiva, podemos advertir que la pareja conjugada extensión-cantidad de movimiento representa la conservación de las cualidades en las partículas elementales. Y, también de modo conspicuo pero no privativo, la pareja conjugada energía-oscilación es exponente de la transformación de esas cualidades y del surgimiento de otras nuevas.

20. *Generalización de las propiedades locales*

En el nivel microcósmico resulta indispensable tener en cuenta las propiedades relativistas del espacio-tiempo, que también se cumplen en dicho nivel. En efecto, los fotones o cuantos de radiación se mueven siempre a la velocidad de la luz, mientras que las otras partículas elementales tienen velocidades comparables, aunque menores. Desde luego, tenemos que las propiedades de los procesos microcósmicos no se pueden determinar aisladamente en el espacio, sino que tienen que ser determinadas conjuntamente con el tiempo. Por otra parte, tenemos que las propiedades locales del espacio-tiempo dependen de la distribución de masas y energías de las partículas elementales que se encuentren en la región correspondiente.[16] Sólo que, como lo acabamos de indicar, en los procesos microcósmicos se amplía el mutuo condicionamiento entre el espacio-tiempo y la distribución de energías y masas, por la inclusión de la influencia recíproca que se ejerce entre las condiciones cinemáticas y el estado dinámico de las

[16] En el espacio-tiempo relativista se tienen dos vectores tetradimensionales, en los cuales se encuentran conjugados el espacio y el tiempo (x, y, z, t) y la cantidad de movimiento y la energía con signo negativo (p_x, p_y, p_z, $-E$).

partículas elementales. Por otro lado, conforme a las consideraciones relativistas, debemos distinguir dos aspectos en el tiempo: el *tiempo local,* constituido por las propiedades temporales de los procesos que se desarrollan en una misma región del espacio; y el *tiempo universal,* integrado por las propiedades temporales de todos los procesos, independientemente de que se encuentren considerablemente alejados en el espacio. Por supuesto, las propiedades del tiempo local están inextricablemente unidas a las propiedades del espacio local; y, análogamente, las propiedades del tiempo universal se encuentran vinculadas inseparablemente con las propiedades del espacio considerado en toda su extensión.[17]

Ahora bien, lo que comúnmente se hace para establecer las propiedades del tiempo universal, es tomar las propiedades locales del tiempo dentro de una región espacial restringida, cuyas propiedades métricas son constantes; y, luego, dichas propiedades son extendidas espacialmente al universo entero. Igualmente, para determinar las propiedades universales del espacio, lo que se hace es referirse a un subconjunto del espacio-tiempo, en el cual se considera como constante al tiempo, para generalizar después dichas propiedades en el tiempo, haciéndolas abarcar también al universo en su totalidad.[18] Con todo, debe quedar muy claro que la extensión de las propiedades del tiempo local al universo entero, implica necesariamente la consideración de la variación del espacio; y, a su vez, que la extensión de las propiedades del espacio local trae consigo la inclusión de la variación del tiempo. Entonces, para establecer una determinación rigurosa de tales propiedades, se plantea ineludiblemente la necesidad de investigar las variaciones temporales y espaciales que se producen en el espacio-tiempo local, en el cual se desarrollan los procesos microcósmicos. En fin, tanto la espacialización del

[17] A. Einstein, *The meaning of relativity,* Princeton, Princeton University Press, 1953.

[18] O sea, que se sigue el procedimiento utilizado por Newton para establecer sus conceptos de tiempo y de espacio.

tiempo como la temporalización del espacio, conducen lógicamente a sintetizar el tiempo y el espacio como componentes de los modos de existencia de los procesos, en el sentido de que los intervalos temporales son simplemente muchísimo mayores que los intervalos espaciales. Así podemos establecer que si el intervalo espacial mide 10^{-14} cm para las partículas elementales, entonces el intervalo temporal correspondiente será de 10^{-24} seg; o sea, que el intervalo espacial viene a ser diez mil millones de veces mayor que el intervalo temporal, cuando utilizamos el sistema *cgs* de unidades de medida.[19] Finalmente, tenemos que ambos intervalos se pueden convertir recíprocamente, el uno en el otro, en virtud de que la relación de magnitudes entre el espacio y el tiempo es la misma que existe entre la masa y la energía, tal como se expresa en la ecuación de Einstein.[20]

21. *El orden de las conexiones causales*

Con los descubrimientos hechos por la física relativista y a través de su profundo examen crítico de la simultaneidad, se ha puesto en claro que el tiempo constituye el orden de las conexiones causales. La relación causal es reducible al orden temporal establecido por lo anterior y lo posterior, porque la causa siempre antecede al efecto y a su vez, el efecto siempre sigue a la causa. De esta manera se pone de manifiesto la estrecha conexión existente entre el orden temporal y los procesos causales. Como se ha podido demostrar también, el orden es invariante ante las transformaciones de Lorentz, para el cambio de coordenadas entre dos sistemas que se mueven uno respecto

[19] En efecto, si el intervalo espacial es de 10^{-14} cm, entonces, tomando en cuenta que la magnitud de la velocidad de la radiación es del orden de 10^{10} cm/seg, tenemos:

$$\text{intervalo temporal} = \frac{\text{intervalo espacial}}{\text{velocidad de la luz}} = \frac{10^{-14}\text{ cm}}{10^{10}\text{ cm/seg.}} = 10^{-24}\text{ seg.}$$

[20] Por cierto que, utilizando esa ecuación, $E = mc^2$, se obtiene el mismo valor para el intervalo temporal.

al otro, únicamente cuando dichos sistemas pueden ser conectados por medio de señales,[21] o sea, por cadenas causales. En algunos casos, las transformaciones de Lorentz permiten la inversión del orden temporal entre ciertos procesos; pero, en rigor, tal inversión solamente es posible respecto de aquellos procesos que no pueden ser vinculados causalmente. Por otra parte, los procesos que se encuentran en conexión causal son temporalmente colindantes y, entre ellos, distinguimos como causa al antecedente y como efecto al consecuente. Entonces, tanto la causa como el efecto los definimos mediante la sucesión temporal. Por lo demás, las causas son contemporáneas de sus efectos, al menos parcialmente; esto es, que la causa se produce antes que el efecto, pero subsiste por lo menos durante una parte del tiempo en que existe el efecto. Como la concatenación causal se establece mediante la transmisión de energía, resulta que no hay efectos que se produzcan instantáneamente, debido a que la velocidad máxima para la transmisión de energía es la velocidad de la energía radiante, en la cual se encuentra incluida la luz. Por consiguiente, siempre transcurre cierto tiempo entre la aparición de la causa y la producción del efecto, aunque ese lapso pueda ser sumamente pequeño. Además, la repetición de una causa trae consigo la repetición del efecto. Y esta reiteración de una cadena causal tiene idéntica duración, es decir, que las mismas causas emplean el mismo tiempo en producir los mismos efectos y, análogamente, causas aproximadamente iguales requieren casi el mismo tiempo en producir efectos semejantes.

Entonces, cuando una conexión causal queda determinada, se puede prever rigurosamente su repetición, cuando se vuelve a presentar la misma causa o cuando se provoca su presentación. El hacer una previsión con base en el conocimiento de una conexión causal, entraña ineludiblemente referir al futuro el pasado conocido. O sea, es tanto como traspasar lo ocurrido en un cierto intervalo

[21] Señal es una discontinuidad en la transmisión de energía, que media entre causa y efecto cuando éstos distan.

de tiempo, a otro intervalo de tiempo por transcurrir. Y esto implica necesariamente la consideración de que el tiempo es homogéneo y congruente, y de que tiene un sentido único. La homogeneidad del tiempo señala su característica de constituir el orden único, común y fundamental en el cual se manifiestan todos los cambios que se desarrollan en los procesos existentes. La congruencia del tiempo significa la posibilidad de transladar un lapso de un intervalo a otro, manteniendo invariantes sus propiedades y sus consecuencias; y, también, representa la posibilidad de superponer varios intervalos temporales a modo de que coincidan en un solo lapso.[22] En fin, el sentido único del tiempo indica aquí el hecho de que la reiteración de una cadena causal se produce siguiendo el mismo orden, sin que sea factible su inversión. Por otra parte, la causalidad se puede expresar matemáticamente por medio de una función en la cual la variable independiente representa a la causa y la variable dependiente al efecto. Más aún, toda función matemática constituye una expresión abstracta de la causalidad, en la cual no se incluye la secuencia temporal, o sea, que se abstrae el intervalo temporal como si no existiera.[23] Por lo tanto, debido a que todas las leyes físicas se expresan cuantitativamente en forma de funciones matemáticas, tenemos que la causalidad se encuentra contenida necesariamente y sin excepción en las leyes físicas. Sin embargo, debido a la simetría que muestran tener las funciones matemáticas y, por ende, las leyes físicas expresadas por ellas, resulta que admiten la inversión.[24] Lo cual significa que las leyes físicas así expresadas no definen un sentido único para la conexión causal, sino que son indiferentes para ambos sentidos. Por

[22] Esta superposición temporal, aceptada ya por la teoría ondulatoria clásica, es análoga a la congruencia espacial de la geometría arquimediana.

[23] Debido a esto es que la relación de causalidad no queda caracterizada exhaustivamente por el concepto matemático de relación funcional.

[24] Si y es una función de x, entonces, x es una función de y. En consecuencia, lo que primero era la variable independiente o causa, se convierte después en variable dependiente o efecto, y viceversa.

consiguiente, las funciones matemáticas en que se expresan dichas leyes representan necesariamente a la causalidad, pero no lo hacen de una manera suficiente. Y su insuficiencia resulta justamente de la abstracción que en ellas se tiene de la secuencia temporal. Entonces, aplicando lógicamente la inferencia causal, tenemos que el tiempo posee inherentemente un sentido único y que este sentido es compartido por la relación causal cuando, y sólo cuando, dicha relación es considerada en su integridad, esto es, sin hacer abstracción del orden del tiempo.

22. *Dimensionalidad del tiempo*

De acuerdo con la física clásica, el tiempo es monodimensional y, por ello, queda completamente determinado por una coordenada única. Conforme a la teoría de la relatividad, el tiempo representa solamente una de las dimensiones del continuo espacio-tiempo y, por ende, queda definido enteramente por una sola de las coordenadas de dicho continuo, la cual es indispensable no confundir con las coordenadas espaciales del propio continuo. Así, para determinar un proceso con respecto al tiempo, es necesario y suficiente con realizar una sola medición en la dimensión temporal. En cambio, cuando se consideran hipotéticamente dos o más dimensiones temporales, se pierde la conexión causal entre los procesos y su determinación deja de ser unívoca. Por consiguiente, en la física relativista se confirma la monodimensionalidad del tiempo, aun cuando no se hace distinción alguna entre los dos sentidos de esa dimensión única.[25] En este aspecto, la representación relativista del tiempo es semejante a la consideración que se hace con relación al tiempo en las ecuaciones de la física clásica. En efecto, como es sabido, las ecuaciones dife-

[25] Por supuesto, el hecho de que el sentido del tiempo no esté incluido en las ecuaciones clásicas y relativistas, no es una prueba en contra de la existencia de dicho sentido, ya que en las interpretaciones científicas se pueden abstraer algunas propiedades de los procesos, sin que eso signifique que las propiedades dejen de existir; y tal cosa ocurre frecuentemente con el tiempo o, al menos, con su sentido.

renciales de la mecánica son de segundo orden y no tienen primeras derivadas respecto al tiempo.[26] Entonces si $f(t)$ es una solución de alguna de esas ecuaciones, también $f(-t)$ es otra solución; porque en las dos diferenciaciones sucesivas se presenta una doble multiplicacion por $\frac{d(-t)}{dt} = -1$, lo cual determina que el resultado sea el mismo en ambos casos. Esto significa que para cada proceso conocido resulta posible, en general, encontrar una representación inversa.[27] Tal posibilidad de inversión deja indefinido el sentido del tiempo; en cambio, sí define la dimensión temporal única, ya que solamente puede haber inversión de sentido estrictamente respecto a una y la misma dirección. Igualmente, pone de manifiesto el orden simétrico de la relación de causalidad, que es invariante ante la inversión en el sentido del tiempo.

El carácter monodimensional del tiempo se muestra de manera todavía más acusada en la física cuántica. En efecto, la ecuación de Schroedinger[28] que gobierna el desarrollo temporal de la función Ψ, es de primer orden respecto a la variable t que representa al tiempo y, por lo tanto, distingue nítidamente un sentido del tiempo de su opuesto. La función $\Psi(q)$ suministra una descripción tan completa como es posible del estado de un sistema y, cuan-

[26] Dichas ecuaciones son:

$$X = m\frac{d^2x}{dt^2};$$

$$Y = m\frac{d^2y}{dt^2};$$

$$Z = m\frac{d^2z}{dt^2}.$$

El planteamiento y la integración de estas ecuaciones puede verse, por ejemplo, en M. Planck, *General Mechanics,* Londres, Macmillan, 1933, pp. 34, 73-85.

[27] Pero esto no indica que para cada proceso exista otro que se desarrolle en el sentido negativo del tiempo.

[28] E. Schroedinger, "Quantisierung als Eigenwertproblem", *Annalen der Physik, 79,* 1926, pp. 361, 373.

do dicho estado cambia en el curso del tiempo, entonces la variable t ingresa como otro argumento de la propia función. Por ello, el propio Schroedinger ha establecido una ecuación diferencial de esa función, $\Psi(q,t)$, que expresa la ley fundamental del cambio en la mecánica cuántica. Como consecuencia, el sentido del tiempo en el cual ocurre el cambio se manifiesta en el signo del argumento t. De esta manera, cuando $\Psi(q,t)$ es una solución de la ecuación, entonces $\Psi(q,-t)$ no es solución de ella, y viceversa. Por lo tanto, subsiste el problema de discriminar entre esas dos funciones para escoger solamente una de ellas; o sea, que se necesita seleccionar inicialmente un sentido o el otro, el positivo o el negativo, para el transcurso temporal. Pero, como se puede advertir, una vez hecha la elección del sentido, ya no es posible invertirlo porque la ecuación no lo admite. Por lo tanto, la ecuación de Schroedinger ofrece una demostración importante de la monodimensionalidad del tiempo en los procesos microcósmicos. A la vez, aún cuando la ecuación no prescribe precisamente uno de los dos sentidos con preferencia al otro, sin embargo, sí establece claramente la exclusión entre ambos y únicamente admite uno o el otro de ellos, pero no los dos.[29] Así se realiza un avance fundamental con respecto a las ecuaciones clásicas y relativistas, que admiten indistintamente los dos sentidos del tiempo y permiten su inversión mutua, por tratarse de ecuaciones diferenciales de segundo orden sin primera derivada parcial. Y, también, se consigue otro progreso fundamental, ya que se cierra completamente el camino para la consideración, así fuera hipotética, de la reversibilidad del tiempo en el nivel microcósmico.

23. *Sentido único del tiempo*

Los procesos irreversibles —como la combustión, la ruptura, la mezcla de líquidos o de gases y la transferencia de

[29] E. Persico, *Fundamentals of Quantum Mechanics,* Nueva York, Prentice-Hall, 1950, pp. 152-164.

calor— se caracterizan por la conservación o el incremento de la entropía,[30] esto es, por la tendencia hacia la desaparición de las diferencias existentes entre los diversos estados de los procesos. Su expresión matemática adopta la forma de una función monótona no-decreciente, en la cual el incremento de la variable temporal produce un aumento en la magnitud de la entropía, o bien, su persistencia en la magnitud anterior, pero nunca su decrecimiento. Por lo tanto, tenemos que los procesos irreversibles sí definen un sentido único para el tiempo, que es precisamente aquél en el cual la entropía no decrece. Dicho sentido definido por el no-decrecimiento de la entropía es considerado como el sentido positivo del tiempo. Ahora bien, conviene traer a cuenta aquí las leyes de la termodinámica.[31] La primera de ellas establece que en todos los intercambios que ocurren entre los procesos, existe una magnitud llamada energía, cuyo valor total permanece constante. Por su parte, la segunda ley de la termodinámica establece la existencia de otra magnitud, denominada entropía,[32] cuyo valor permanece constante en algunos cambios de estado de los procesos y en otros cambios aumenta.[33] Entonces, tomando en cuenta la con-

[30] La entropía es una magnitud definida en función de propiedades termodinámicas —como la temperatura, la presión, la energía y el volumen— en la cual no se consideran las propiedades fundamentales de la mecánica —como son la posición y la velocidad.

[31] Es preciso tener presente la correspondencia entre las teorías físicas referentes a los diversos niveles de la existencia. Véase la Sección 5.

[32] En rigor, el comportamiento termodinámico de un proceso está determinado por una función característica, cuyo conocimiento es suficiente para determinar unívocamente las condiciones de los distintos estados de equilibrio físico y químico en que se puede encontrar dicho proceso. Y la forma de esa función característica depende de las variables independientes que se consideren. Así, cuando dichas variables son la energía y el volumen, la función característica es la entropía; cuando las variables son el volumen y la temperatura, la función característica corresponde a la energía libre; y cuando las variables son la temperatura y la presión, la función característica es el potencial termodinámico dividido entre la temperatura con signo negativo. Véase M. Planck, *Treatise on Thermodynamics*, Nueva York, Dover, 1945, pp. 112-124.

[33] Como es sabido, la tercera ley de la termodinámica, formulada por W. Nernst en 1906 (*Nach. d. Ges. d. Wissensch. zu Göttingen, Math. phys., I*, 1906; *Sitz. - Ber. d. preuss. Akad. d. Wiss., 20*, 1906) y verificada

jugación existente entre la energía y el tiempo, podemos señalar también la existencia de una correlación inseparable entre el tiempo y la entropia. De este modo, la ley de conservación de la energía viene a ser otra expresión del orden asimétrico de la causalidad y, por ende, de la monodimensionalidad del tiempo, pero con la admisión posible de uno u otro de los sentidos de esa dimensión única. En cambio, la ley de la conservación y el no-decrecimiento de la entropia representa la definición de un solo sentido para el tiempo, dentro de su dimensión única. Por consiguiente, es enteramente lógico utilizar la segunda ley de la termodinámica como base para fijar el sentido unívoco que tiene el tiempo.

Es importante tener en cuenta que las leyes termodinámicas indican el sentido del tiempo, pero son ajenas a su medición; es decir, que señalan un sentido unívoco para el flujo del tiempo, sin hacer referencia a la métrica de ese transcurso.[34] También se puede tomar como índice del flujo del tiempo a la desintegración de un elemento radiactivo. En efecto, si consideramos una muestra de alguno de esos elementos, entonces entre dos instantes diferentes, t_a y t_b, queda definido como posterior aquél en el cual la cantidad de la muestra es menor y, recíprocamente, es anterior el instante en que la cantidad de la muestra es mayor. La utilización del proceso de desintegración radiactiva tiene la ventaja de que el lapso transcurrido entre dos instantes cualesquiera, posee un valor medio que se

después ampliamente en los experimentos científicos, establece que, cuando disminuye indefinidamente la temperatura de un proceso químicamente homogéneo y de densidad finita, entonces su entropia se aproxima indefinidamente a un valor definido, que es independiente de la presión, del estado de cohesión y de los cambios químicos particulares. Como la expresión del valor de la entropia contiene una constante arbitraria, resulta que en el límite, en el cero absoluto de temperatura, la entropia de un proceso es igual a cero. Y, por cierto, como consecuencia de este descubrimiento, se ha derrumbado definitivamente lo que se empleaba como supuesta base para todas las fantásticas especulaciones que se hacían acerca de la "muerte térmica" del universo. Véase M. Planck, *Treatise on Thermodynamics*, pp. 272-274.

[34] En cambio, como hemos visto, otras leyes físicas que determinan la métrica del tiempo no definen su sentido.

puede determinar con precisión.[35] Por lo tanto, en la desintegración radiactiva de los átomos tenemos un patrón objetivo que nos suministra a la vez el sentido del tiempo y su medida. Asimismo, la transmisión de señales, por mediación de la cual se establecen las cadenas causales, es un proceso que se encuentra vinculado con el crecimiento termodinámico de la entropia y, por consiguiente, nos ofrece igualmente otro modo de medir el tiempo tomando en cuenta la irreversibilidad de su sentido. Más aún, incluso dentro de la teoría cuántica "ortodoxa" se considera el sentido del tiempo como algo definido. En efecto, conforme a dicha teoría, se supone que un conjunto de partículas elementales y su entropia correspondiente no cambian en nada mientras no se les somete a observación. Por otra parte, se sostiene también que la descripción de los estados en que se encuentra el conjunto de partículas elementales es indagada a través de una sucesión de pruebas, lo cual implica la consideración de que el conjunto tiene un desarrollo monótono, prueba tras prueba, debido a su tendencia al incremento de la entropia. Además, resulta que el registro de las pruebas muestra de manera inequívoca cuál prueba fue anterior y cuál fue posterior en ese desenvolvimiento. Por todo esto, podemos establecer que en un proceso cuántico elemental, como el movimiento de un solo electrón, por ejemplo, el sentido del tiempo queda determinado unívocamente. Y lo mismo sucede con los procesos cuánticos en que interviene un gran número de partículas elementales.

En cuanto al sujeto que realiza las observaciones, tenemos que tener en cuenta que el hombre también forma parte del mundo objetivo y que su memoria es un instrumento de registro que se encuentra gobernado por las leyes de la teoría de la información. Entonces, de acuerdo con esas leyes, el incremento de la cantidad de información

[35] En el caso de los procesos termodinámicos, no es posible hacer esa determinación cuantitativa del intervalo temporal en que se desarrollan, porque el lapso varía de una instancia a otra o, más bien, su desenvolvimiento es indiferente a la magnitud del tiempo transcurrido.

también define sin ambigüedad el sentido del tiempo. Las experiencias pasadas se encuentran registradas en nuestra memoria, mientras que las experiencias futuras sólo podrán quedar registradas cuando se lleguen a efectuar y nunca antes. Así, el tiempo subjetivo de nuestra experiencia no es otra cosa que una manifestación de las propiedades temporales de los procesos objetivos, a través del instrumento de registro que es nuestra memoria. Y esta manera de definir el sentido del tiempo no constituye un privilegio humano, ya que cualquier instrumento de registro funciona de la misma manera, independientemente de que sea un instrumento natural o de que haya sido construido artificialmente. En consecuencia, la definición del sentido del tiempo surge aquí de la relación existente entre el instrumento de registro y el medio objetivo en el cual ocurren los procesos que registra. Y dicha relación es la misma para todos los instrumentos de registro, incluyendo entre ellos a la memoria humana, en virtud de la isotropía y la homogeneidad del universo.[36]

En lo que se refiere a las hipótesis que se han propuesto [37] acerca de que el positrón —esto es, el electrón con carga positiva— pueda ser considerado como un negatrón —o sea, el electrón con carga negativa— que se mueve en el sentido contrario al tiempo,[38] no pasa de ser una mera especulación matemática sugerida por el ensayo de cambiar simultáneamente los signos de la carga y del tiempo, en las ecuaciones correspondientes al electrón. Otra es-

[36] Por isotropía se entiende que en el universo no existe privilegio alguno para un lugar o una dirección en particular. La homogeneidad significa que la historia del universo es siempre idéntica en su contenido, aunque se le enfoque desde los más diversos lugares.

[37] Véase E. C. G. Stückelberg "Remarque à propos de la création de paires de particules en théorie de relativité", *Helv. Phys. Acta, 14,* 1941, pp. 588-594; del mismo autor, "La mécanique du point matériel en théorie de relativité et en théorie des quanta", *Helv. Phys. Acta, 15,* 1942, pp. 23-27; y R. P. Feynman. "The theory of positrons", *Phys. Rev., 76,* 1949, pp. 749-759.

[38] En tal caso, la carga unitaria del electrón que viajara en sentido temporal opuesto tendría, teóricamente, los mismos efectos que la carga unitaria que viaja en el sentido directo del tiempo.

peculación análoga consistiría en formular la hipótesis de que el neutrón fuese considerado como un protón para el cual quedaran anulados el tiempo y la carga. Además, con arreglo a semejantes hipótesis se perdería el orden dimensional del tiempo, se invertiría la conexión causal y resultaría que una y la misma partícula existiría en más de un espécimen a la vez.[39] En fin, en lo que respecta a la posibilidad de escoger inicialmente un sentido para el tiempo o el sentido opuesto, en la ecuación de Schroedinger, no se debe olvidar que una vez hecha la elección ya no se puede luego invertir el sentido, porque se altera la ecuación. Por lo demás, hay que tener en cuenta que las funciones matemáticas no siempre representan a la realidad física de una manera suficiente, sino que muchas veces se permite en ellas hacer abstracción de alguna o algunas de las propiedades fundamentales de la existencia. En particular, nunca debemos perder de vista que la matemática se ha especializado profundamente en la investigación de las propiedades del espacio,[40] bajo el supuesto abstracto de la invariancia del tiempo ante las transformaciones espaciales. En suma, por todo lo antes expuesto, podemos concluir que el sentido unívoco del tiempo queda definido sin ambigüedad por algunas de las leyes bien determinadas de los procesos microcósmicos y que, por otra parte, dicho sentido único e irreversible es enteramente compatible con las otras leyes de la física cuántica,

[39] Por ejemplo, en lugar del conocido proceso en el cual un fotón *gamma* se transforma en una pareja negatrón-positrón y, luego, el positrón se conjuga con otro negatrón para constituir otro fotón *gamma;* lo que se tendría entonces entre ambos fotones *gamma* sería la existencia de uno y el mismo electrón en tres especímenes distintos, a saber: un negatrón con sentido temporal positivo, un negatrón con sentido temporal negativo y otro negatrón con sentido temporal positivo.

[40] El fundamental descubrimiento hecho por Lee y Yang (véase la Sección 14), plantea de manera más imperiosa que nunca la necesidad de formular una nueva teoría de los procesos microcósmicos. A la vez, demuestra que el espacio es asimétrico, al menos en algunos casos. Por lo tanto, no habiendo una simetría completa entre la izquierda y la derecha, desaparece por entero la posibilidad de sostener, por analogía, que el futuro y el pasado sean simétricos o, lo que es lo mismo, que el tiempo sea reversible.

lo mismo que con las leyes de la mecánica clásica y con las de la teoría de la relatividad.

24. *Irreversibilidad de la duración*

Como ya lo hemos expresado, la física relativista ha puesto al descubierto algunas propiedades del tiempo que anteriormente ni siquiera se sospechaban. Dichas propiedades se pudieron destacar, principalmente, debido a la conjugación del espacio con el tiempo en el continuo tetradimensional de espacio-tiempo y, también, debido a la constancia de la velocidad máxima de propagación de la energía con un valor muy grande pero finito.[41] Por otra parte, la topología ha descubierto también algunas propiedades generales del espacio que antes no se habían podido advertir. Y, a pesar de que en las investigaciones topológicas se hace abstracción del tiempo, no obstante sus resultados permiten inferir por estricta analogía ciertas conclusiones acerca de las propiedades del tiempo; sobre todo, en tanto que éste se puede considerar semejante a una dimensión del espacio, sólo que con un sentido único y en un orden asimétrico. Entonces, combinando los descubrimientos relativistas con las conclusiones topológicas, podemos resumir las propiedades de la duración o transcurso del tiempo de la siguiente manera: a) el tiempo transcurre del pasado al futuro; b) el presente divide localmente al pasado del futuro, y viceversa; c) el pasado nunca retorna, es irrevocable; d) es posible tener registros de los acontecimien-

[41] Algunos resultados experimentales recientes, sugieren la posibilidad de que en ciertos procesos microcósmicos la energía se pueda transmitir a una velocidad mayor que la de la radiación. Sin embargo, aún cuando se llegara efectivamente a descubrir la existencia de una velocidad mayor que la de la luz, tal cosa no vendría a modificar (según todos los indicios que se tienen) el hecho de que la energía no se puede transmitir a velocidades infinitamente grandes. En tal caso, simplemente se habría encontrado un nuevo valor máximo como límite de la velocidad a que se puede transmitir la energía; porque la limitación finita de la velocidad de propagación de las señales, es una consecuencia de las leyes de conservación de la energía y la cantidad de movimiento. Véase S. Meliujin, *Dialéctica del desarrollo en la naturaleza inorgánica*, México, Editorial Grijalbo, 1963, p. 204.

tos pasados, pero es imposible tenerlos del futuro; e) existe la posibilidad de cambiar el futuro, pero no el pasado, porque tenemos la oportunidad de intervenir de algún modo en el porvenir; f) la intervención en el futuro está condicionada por el pasado; g) el pasado se encuentra determinado, mientras que el futuro está indeterminado aunque, en principio, es determinable; h) el presente es un intervalo que puede hacerse muy pequeño o alargarse mucho, pero siempre es finito y su duración depende de la distancia existente entre los procesos que se comparan en el tiempo y de la intensidad de su interacción; i) el presente es el lapso en el cual los acontecimientos no son pasados ni futuros y en donde, a la vez, ocurre la coincidencia entre el futuro y el pasado; y, j) no existe la simultaneidad con respecto a todos los lugares, porque un presente local puede corresponder al futuro en distinto lugar y al pasado en otro lugar más.[42]

En la existencia universal de los procesos objetivos, la irreversibilidad del tiempo se encuentra vinculada intrínsecamente con el surgimiento, el desarrollo y la desaparición de los propios procesos. El tiempo caracteriza así la sucesión de los acontecimientos y representa la medida de la duración de sus cambios y transformaciones. Por ello, el ritmo del tiempo depende del carácter y la intensidad de las interacciones entre los procesos, lo mismo que de su estructura dinámica interna. Así, las propiedades métricas del tiempo en el macrocosmos, son distintas a las que tiene en el mesocosmos y, también, son diferentes a las que muestra en el microcosmos. Por ejemplo, la física relativista ha establecido que el flujo del tiempo se hace más lento en las proximidades de los cuerpos estelares que tienen una masa suficientemente grande y un campo gravitacional sumamente intenso. Por otra parte, el ritmo del tiempo varía igualmente en función de las velocidades de los procesos, como lo confirman algunos experimentos hechos en el dominio de las partículas elementales. Por

[42] H. Reichenbach, *El sentido del tiempo*, México, U.N.A.M., Problemas Científicos y Filosóficos, 1959, pp. 35-42.

ejemplo, en los experimentos de desintegración de los mesones *pi,* se ha comprobado que la vida media de un mesón y la distancia que recorre, son tanto mayores mientras más se aproxima su velocidad a la de la luz; lo cual significa que en ese caso se hace más lento el proceso interno de desintegración del propio mesón.[43] De la misma manera, si se tuvieran dos relojes "atómicos" [44] y uno de ellos se enviara a un satélite artificial de la Tierra, en tanto que el otro se quedara como testigo sobre la superficie terrestre, entonces, al cabo de algunos meses se podría comprobar que el reloj colocado en el satélite, que se mueve a una velocidad de 8 km/seg, mostraría un retraso de una pequeña fracción de segundo con respecto al reloj mantenido "en reposo" en la Tierra.[45] Desde luego, este retardamiento en el flujo del tiempo resulta paradójico en relación con la concepción clásica de que su transcurso es uniforme y homogéneo. Pero la paradoja se disuelve por el hecho de que el tiempo es sencillamente la medida de la duración de los cambios que sufren los procesos existentes y, por lo tanto, la aceleración o el retardamiento de su ritmo se encuentra determinado por las interacciones entre los procesos y la velocidad de su movimiento relativo. En consecuencia, tenemos que cada conjunto de procesos posee su propio ritmo de duración, el cual depende de los nexos y la velocidad relativa de dicho conjunto con respecto a los otros conjuntos de procesos. En

[43] La ecuación que determina ese retardamiento es:

$$T_{mov} = \frac{T_o}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

en donde: T_{mov} es la vida media del mesón en estado de movimiento, T_o es su vida media en estado de reposo relativo, v es la velocidad del mesón y c es la velocidad de la luz. Véase S. Meliujin, *Dialéctica del desarrollo . . .*, p. 207.

[44] En esos relojes se utiliza como fuente de los procesos periódicos a las oscilaciones de las moléculas de amoníaco, que se distinguen por su constancia rigurosa.

[45] Cuando se logren construir naves espaciales que viajen a velocidades comparables a la de la luz (recuérdese que su valor es de 300 000 km/seg), dicho retraso aumentará enormemente.

último término, el ritmo local de la duración se encuentra vinculado íntimamente con el carácter finito que tiene la velocidad de propagación de las interacciones entre los conjuntos de procesos.

La irreversibilidad de la duración temporal es una manifestación de la irreversibilidad universal de los procesos existentes. En efecto, el desarrollo de un proceso pasa por una sucesión de estados diferentes, que podemos representar simbólicamente por *A, B, C, D, E, F, G,* por ejemplo. Pues bien, la posibilidad de que ese mismo proceso sea reversible, consiste en la inversión de esa secuencia, de tal manera que el proceso también pueda transcurrir en sentido opuesto, o sea, que la sucesión de sus estados fuese: *G, F, E, D, C, B, A*. Esta inversión se realiza en muchos casos, pero únicamente de manera aproximada. En rigor, el pleno retorno de un proceso a un estado anterior, constituye un caso extremo e idealizado. Es más, aún en el caso de que un proceso volviera a encontrarse exactamente en alguno de sus estados anteriores, habría todavía una diferencia: la del instante en que tal cosa ocurriera, que sería distinto al instante en que el mismo proceso se encontraba anteriormente en tal estado. Por lo tanto, el retorno de los procesos a sus estados anteriores es siempre incompleto. En consecuencia, tenemos que el desarrollo de los procesos objetivos es asimétrico en el tiempo y que esa asimetría se encuentra condicionada por la irreversibilidad de sus cambios de estado. Por otra parte, existen otros muchos procesos cuya irreversibilidad es tan acusada, que ni siquiera de un modo aproximado se les puede considerar como reversibles. En los niveles macrocósmico y mesocósmico, dicha irreversibilidad se manifiesta en el no-decrecimiento de la entropia. Pero es indispensable tener en cuenta con claridad, que el incremento o la conservación de la entropia es una consecuencia de la irreversibilidad del tiempo. Por otro lado, tampoco debemos olvidar que la entropia no es una propiedad universal de los procesos existentes, sino que solamente corresponde a aquellos procesos que se caracterizan por sus parámetros termo-

dinámicos; o sea, dicho de otra manera, que únicamente tiene significación a partir del nivel de los movimientos moleculares. En cambio, la duración temporal y su irreversibilidad se manifiestan universalmente en todos los niveles de la existencia. Como ya lo expresamos, en los niveles microcósmicos no existe una equivalencia completa entre los dos sentidos del tiempo.[46] Además, es posible que la manifestación mesocósmica de esa situación sea justamente la ley del incremento de la entropia. En resumen, tenemos que en el universo, los cambios que son relativamente reversibles en un sistema cualquiera, corresponden a cambios irreversibles en otro sistema más general; y análogamente, los cambios reversibles que se producen en un nivel, corresponden a cambios irreversibles en otro nivel limítrofe del primero. Entonces, en su conjunto, el desarrollo de los procesos existentes es irreversible. Y esa irreversibilidad del universo en su desarrollo es una manifestación de los intercambios de masa y energía que se producen entre todos los procesos, sistemas y niveles de la existencia, mismos que traen como consecuencia la realización de cambios irreversibles en los procesos, sistemas y niveles con los cuales se encuentran en interacción.

25. *Cuantización del tiempo*

Uno de los rasgos comunes a la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica, que ya hemos tenido oportunidad de señalar, lo constituye el descubrimiento de que existen límites finitos para ciertas propiedades fundamentales. Así, tanto en el nivel macrocósmico como en el microcósmico, se ha determinado la existencia de valores críticos cuya magnitud no puede ser traspasada. En los procesos macrocósmicos, la propiedad singularizada es la *velocidad* y su valor crítico es *c,* la velocidad de la luz. En los procesos microcósmicos, la propiedad destacada es el *cambio en la acción* y su valor crítico es *h,* la constante universal de

[46] Véase la Sección 22.

Planck. Por consiguiente, la velocidad a que se transmite la energía tiene un límite máximo extremadamente grande, pero finito; y, a su vez, los cambios en la acción tienen un límite mínimo sumamente pequeño, pero finito también.[47] De esta manera, ha quedado en claro que la energía no se transmite nunca de modo instantáneo, sino que su transmisión tiene una cierta duración que, cuando menos, es la correspondiente al tiempo que tarda la energía en recorrer la distancia respectiva a la velocidad de la luz. A la vez, sucede también que la energía sólo se transfiere en dosis que son siempre múltiplos enteros del cuanto correspondiente, sin que sea posible la transferencia de una cantidad de energía menor que dicho valor determinado e indiviso. Ahora bien, es de gran importancia señalar que en ambos valores críticos figura el tiempo como uno de los elementos integrantes de la propiedad física que ha quedado limitada cuantitativamente, o sea, de la velocidad y el cambio en la acción, respectivamente.[48] Esta coincidencia hace que el tiempo se destaque todavía más como una de las propiedades fundamentales de la existencia. También significa que el tiempo no puede ser subdividido indefinidamente, sino que está formado por intervalos que tienen una duración sumamente pequeña. En otras palabras, resulta que el tiempo tiene características cuánticas y, por ende, discontinuas, respecto a la transmisión y la transferencia de energía.

Del mismo modo como el *cuanto de longitud*[49] expresa los límites espaciales para la localización de las interacciones de las partículas elementales, así también el *cuanto de tiempo* representa el periodo mínimo de las variaciones físicas de las propias partículas. Como valor de ese intervalo temporal mínimo se ha establecido el orden de magnitud de 10^{-24} seg, calculando el tiempo durante el

[47] El límite máximo de la velocidad conocido hasta ahora es el de la velocidad de la luz, $c = 2.99776 \times 10^{10}$ cm/seg. Y el límite mínimo para el cambio en la acción es: $h = 6.6237 \times 10^{-27}$ erg · seg.

[48] La velocidad es el cambio espacial en el tiempo; y la acción es el producto de la energía por el tiempo.

[49] Véase la Sección 15.

cual la energía radiante se puede propagar a una distancia de un cuanto de longitud.[50] Sin embargo, la magnitud mínima de tiempo que se ha podido registrar efectivamente hasta ahora es de 10^{-15} seg y corresponde al periodo de desintegración del mesón *pi* neutro; que, como se advierte, tiene un valor mil millones de veces mayor que el establecido para el cuanto de tiempo. Pero, independientemente de que aún no haya sido posible comprobar experimentalmente el valor del cuanto de tiempo, se conocen otros muchos resultados experimentales que hacen ineludible la consideración de su existencia. Desde luego, los cambios que se producen como consecuencia de la interacción entre las partículas elementales, solamente son posibles en intervalos de tiempo iguales al cuanto de duración o que sean múltiplos enteros de éste. Por otra parte, es posible que en el nivel de la estructura interna de las partículas elementales, exista un cuanto de tiempo todavía más pequeño,[51] del orden de magnitud de 10^{-60} a 10^{-110} seg, que correspondería al valor del cuanto de longitud en ese nivel, que sería posiblemente de 10^{-50} a 10^{-100} cm. Más aún, tal vez en el nivel correspondiente a la estructura interna del átomo, en donde el cuanto de longitud adquiere el valor de 10^{-8} cm, también sea necesario fijar otra magnitud para el cuanto de tiempo que, en tal caso, sería del orden de 10^{-18} seg. Por lo tanto, hay la posibilidad de que existan diferentes cuantos de tiempo para los distintos niveles microcósmicos.

Dentro del átomo, los electrones se mueven siempre a lo largo de las órbitas cuánticas, cuyas distancias al núcleo atómico forman una serie de valores discretos;[52] y, a la

[50] El cálculo se ha hecho mediante la siguiente relación:

$$\text{cuanto de tiempo} = \frac{\text{cuanto de longitud}}{\text{velocidad de la luz}} = \frac{10^{-14}\ \text{cm}}{10^{10}\ \text{cm/seg}} = 10^{-24}\ \text{seg.}$$

[51] Véase, por ejemplo, A. A. Abrikosov e I. M. Jalatnikov, "L'interaction des particules elementaires", *Recherches Internationales: Physique, Quelques problèmes philosophiques,* París, Editions de la Nouvelle Critique, *4,* 1957, pp. 161-164.

[52] En el caso más simple, del átomo de hidrógeno, la distancia mínima es de: 0.527×10^{-8} cm.

vez, las longitudes de tales trayectorias son múltiplos enteros de la longitud de onda de los propios electrones. A cada una de esas órbitas cuánticas le corresponde una energía de magnitud definida y, por consiguiente, una frecuencia u oscilación temporal también finita. Así, existe una rigurosa discontinuidad en el tiempo que tarda un electrón en recorrer las distintas trayectorias posibles alrededor del núcleo. Por otro lado, tenemos que el paso del electrón de una órbita a otra, ya sea por absorción o por emisión de energía, se produce de manera brusca, como un salto cuántico. Ordinariamente, esa energía es absorbida o emitida en forma de radiación, por lo cual su magnitud está conectada con su frecuencia, o sea, con el inverso del tiempo. Por lo tanto, en la transferencia mutua de energía radiante que se realiza entre el átomo y el exterior, el tiempo muestra igualmente su carácter cuántico. En lo que se refiere al interior del átomo, lo podemos representar como una sucesión de transcursos temporales continuos, que corresponden a las revoluciones orbitales posibles, que están separadas por intervalos en los cuales no se manifiestan los electrones, pero que permiten su salto de una órbita a otra. Por ende, el tiempo interno del átomo está constituido por trozos de continuidad separados entre sí y cuyo enlace se establece de manera súbita e intermitente. Tales saltos bruscos de los electrones impiden su representación en un tiempo continuo, a la vez que tampoco permiten la consideración de una continuidad espacial. Por lo demás, en las órbitas, que son temporalmente continuas, la cantidad de movimiento del electrón queda determinada por su energía, mientras que la longitud de su trayectoria se encuentra definida por la frecuencia de su movimiento ondulatorio. Por consiguiente, aquí nos encontramos de nuevo con la conjugación dialéctica entre el espacio, el tiempo, la energía y la cantidad de movimiento de las partículas elementales.

Fuera del átomo, las trayectorias de las partículas ele-

mentales no pueden ser determinadas de una manera unívoca y continua. Es posible establecer con precisión, por ejemplo, la salida de un fotón y su llegada, esto es, su emisión y su absorción. Pero no es posible determinar rigurosamente cuál es la trayectoria que sigue un fotón entre el instante de su emisión y el de su absorción. Además, en general, las partículas elementales se manifiestan únicamente cuando reaccionan con otras partículas y, por consiguiente, sólo se muestran de trecho en trecho, sin que se les pueda atribuir una trayectoria continua. Por eso es que la mecánica cuántica se limita a vincular entre sí las diversas manifestaciones sucesivas y discontinuas de la existencia temporal de una partícula elemental, sin poder precisar lo que ocurre en el intervalo intermedio. Esto significa que las propiedades temporales de las partículas elementales únicamente se exhiben de manera intermitente. A la vez, dentro del átomo, tampoco es posible hacer una determinación temporal directa de las partículas elementales. Porque no se puede medir directamente la duración de la revolución orbital de un electrón; es decir, que no es posible determinar el tiempo que transcurre en un espacio definido como es la órbita cuántica. Y, lo que es más, tampoco es posible hacer determinación alguna de la duración de un salto cuántico de una órbita a otra. En cambio, sí se pueden determinar con exactitud las frecuencias de la energía radiante emitida por el átomo, como consecuencia de un salto cuántico. Más aún, es posible determinar aproximadamente las características temporales de la órbita, junto con el estado cuántico del electrón que la recorre. Con todo, parece obligado aceptar la existencia de trayectorias intermitentes para el movimiento de las partículas elementales. En consecuencia, tenemos que tomar en cuenta la posibilidad de que el tiempo se manifieste como una discontinuidad cinemática en el nivel microcósmico de la existencia.

26. *Dominio de la cronotópica*

Con anterioridad hemos planteado ya la cuestión de que las características singulares que se manifiestan en las propiedades espaciales de los procesos microcósmicos, parecen imponer la necesidad de formular una geometría todavía más general que la topología, en la cual se pueda "romper" el espacio, para estudiar así cuáles son las propiedades que se mantienen invariantes ante esa clase de transformaciones.[53] En otras palabras, lo que se plantea es la exigencia de establecer una geometría que trate las transformaciones discontinuas del espacio. Dicha exigencia encuentra un importante correlato en las características discontinuas que también el tiempo muestra tener en el nivel microcósmico. Por otro lado, tenemos que las rupturas del espacio, que son incompatibles con la hipotética reversibilidad del tiempo, resultan en cambio enteramente compatibles con su irreversibilidad objetiva. En lo que respecta al tiempo y sus propiedades, no existe propiamente una disciplina que se ocupe específicamente de su estudio; por más que en la mayor parte de las ciencias resulte ineludible su consideración. En todo caso, lo que se ha hecho hasta ahora es establecer algunas de las propiedades del tiempo por analogía con las del espacio. Para ello, se toma indirectamente como modelo abstracto del tiempo, el orden asimétrico del espacio en una sola dimensión y se reduce ésta a un sentido único. De lo anterior se desprendería la necesidad de establecer una disciplina, la *cronometría,* que se dedicara específicamente al estudio de las propiedades del tiempo. Sin embargo, debido a la vinculación indisoluble existente entre el espacio y el tiempo, lo que más bien se impone establecer decididamente es la nueva disciplina de la *cronotópica,* para estudiar conjuntamente el espacio, el tiempo y sus relaciones.

Las bases de la *cronotópica* se encuentran en las propiedades que se han descubierto, tanto en el nivel macrocós-

[53] Véase la Sección 15.

mico como en el microcósmico, y que no es posible tratar dentro del dominio de las geometrías actuales. En el nivel macrocósmico podemos citar la conjugación del espacio y el tiempo en el continuo espacio-tiempo, la covariancia y la reciprocidad de sus transformaciones, la relatividad de la simultaneidad y de la longitud, la dependencia de las distancias respecto a la distribución de masas y energías y, en general, los vínculos del espacio-tiempo con el continuo energía-cantidad de movimiento. En el otro extremo de la experiencia, en el nivel microcósmico, tenemos los nexos entre la extensión y la cantidad de movimiento, lo mismo que entre la energía y la oscilación, la asimetría espacial respecto a la reflexión especular, la dualidad entre el aspecto corpuscular y el aspecto ondulatorio de las partículas elementales, la discontinuidad del espacio y el tiempo en el interior del átomo, la intermitencia de las trayectorias recorridas por las partículas elementales, la posible asimetría del tiempo y la existencia de cuantos de longitud y de cuantos de duración. Por último, como consecuencia de la dualidad inseparable de la coexistencia objetiva del corpúsculo y la onda en la partícula elemental, y en virtud del principio de exclusión de Pauli, tenemos la manifestación de dos propiedades espaciales bastante extrañas de dicha partícula, como son la politopía y la homotopía,[54] a las cuales corresponden sendas propiedades temporales también extrañas.

La politopía consiste en que cada partícula elemental ocupa diversos lugares en el mismo instante. Por su parte, la homotopía significa que cada lugar es ocupado por varias partículas elementales en el mismo instante. Pues bien, del hecho de que dos partículas elementales integrantes del mismo sistema no puedan tener jamás la misma energía y la misma cantidad de movimiento, se desprende también la consecuencia de que en cada instante se encuentran varias partículas en el mismo lugar. Esta propiedad temporal representa el *homocronismo* de las partículas elementales. Por otra parte, por analogía con la

[54] Véase la Sección 13.

propiedad espacial macrocósmica y mesocósmica de la *monotopía* —esto es, que cada partícula ocupa un solo lugar en el mismo instante—, resulta otra propiedad temporal que tal vez exista en el nivel microcósmico, que es el *monocronismo,* o sea, que cada partícula se encuentre un solo instante en el mismo lugar. En todo caso, es posible establecer una correspondencia analítica entre las propiedades espaciales y las propiedades temporales, semejante a la dualidad descubierta por Plücker entre los puntos y las líneas,[55] de la siguiente manera:

Propiedades espaciales	*Propiedades temporales*
Monotopía: Cada partícula ocupa un solo lugar en el mismo instante.	*Monocronismo:* Cada partícula se encuentra un solo instante en el mismo lugar.
Politopía: Cada partícula ocupa diversos lugares en el mismo instante.	*Policronismo:* Cada partícula se encuentra en distintos instantes en el mismo lugar.
Heterotopía: Cada partícula ocupa diversos lugares en distintos instantes.	*Heterocronismo:* Cada partícula se encuentra en distintos instantes en diversos lugares.
Homotopía: Cada lugar es ocupado por varias partículas en el mismo instante.	*Homocronismo:* En cada instante se encuentran varias partículas en el mismo lugar.
Isotopía: Cada lugar es ocupado por varias partículas en distintos instantes.	*Isocronismo:* En cada instante se encuentran varias partículas en diversos lugares.
Anisotopía: Varias partículas ocupan diversos lugares en distintos instantes.	*Anisocronismo:* Varias partículas se encuentran en distintos instantes en diversos lugares.

De todo esto se concluye la urgencia de elaborar una teoría matemática de las transformaciones irreversibles, asimétricas y discontinuas, en la cual se puedan considerar las "rupturas" del espacio-tiempo, lo mismo que la asimetría de sus dimensiones y la irreversibilidad de sus cambios. Dicha teoría permitirá indagar matemáticamente las propiedades del espacio sin hacer abstracción del tiempo y, viceversa, las propiedades del tiempo sin hacer abstracción del espacio. Así, una vez que se logren resolver las graves dificultades matemáticas que implica semejante elaboración,[56] se tendrá el instrumento adecuado para la representación del espacio-tiempo en su integridad. Y, con dicho instrumento, se podrá abordar plenamente el estudio del dominio de la *cronotópica.*

27. *Tiempo microcósmico*

Tomando como base todo lo examinado anteriormente, podemos apuntar las modalidades asumidas por el tiempo en el nivel microcósmico. Por principio de cuentas, tenemos que la relación temporal es una de las formas fundamentales en que se manifiesta la existencia de los procesos microcósmicos.[57] Sólo que el tiempo no es algo independiente de los procesos, ni constituye tampoco una especie de flujo abstracto en el cual transcurriesen los cambios de los procesos microcósmicos. En realidad, el tiempo es el conjunto de las propiedades temporales inherentes a los procesos microcósmicos, esto es, que dichos procesos no existen en el tiempo, sino que su existencia es temporal. Y, lo que es más, el carácter común que tienen las propiedades temporales de las partículas elementales, por

[55] J. Plücker, *Analytisch-Geometrische Entwicklungen,* Essen, vol. II, 1831.

[56] Véase la Sección 15.

[57] Si el tiempo fuese meramente subjetivo y los procesos microcósmicos tuviesen una existencia intemporal, con seguridad que los físicos ya hubieran prescindido del tiempo en sus explicaciones sobre la realidad objetiva y, lo que es más, habrían podido ignorarlo por completo en sus concepciones.

ejemplo, destaca de modo definido la pertenencia inesquivable de cada una de ellas a su medio y, en consecuencia, la interacción y el intercambio de energía incesantes entre todas ellas. Por otra parte, tenemos que el tiempo microcósmico tiene dos aspectos diferentes aunque inseparables, que son la energía y la oscilación ondulatoria. Cada uno de estos aspectos temporales se conjuga con sendas formas del espacio microcósmico: la energía está vinculada con la cantidad de movimiento y la frecuencia con la longitud de onda. A la vez, esas dos conjugaciones espacio-temporales también se encuentran enlazadas estrechamente entre sí. De esta manera, la unidad continua energía-cantidad de movimiento-frecuencia-longitud de onda, establece una temporalización del espacio que entraña, irremediablemente, la espacialización consecuente del tiempo.

Otra de las propiedades del tiempo microcósmico es su transcurso continuo, el cual se encuentra aparejado con el carácter cuántico y, por consiguiente, discontinuo de la transmisión y la transferencia de energía. En el interior del átomo, el tiempo se muestra como una sucesión de transcursos temporales continuos, como son los periodos de revolución orbital de los electrones, los cuales están separados por intervalos discontinuos, que sólo permiten el paso de los electrones de una órbita a otra, de manera repentina e intermitente. Fuera del átomo, las partículas elementales siguen trayectorias discontinuas y únicamente se manifiestan de trecho en trecho. En cambio, en su movimiento ondulatorio, las partículas elementales exhiben su continuidad y su persistencia, tanto temporal como espacialmente. Por otra parte, el tiempo constituye el orden de las conexiones causales, hasta el punto de que las causas son definidas mediante el tiempo y las conexiones causales mismas se establecen a través de la transmisión y la transferencia de energía, que es otra propiedad temporal. Este orden del tiempo es homogéneo, congruente, reflexivo, irreflexivo, simétrico, asimétrico y transitivo a la vez. Además, el tiempo es monodimensional, tiene un

solo sentido dentro de su dimensión única y es rigurosamente irreversible. Pero no hay necesariamente simultaneidad entre el pasado, el presente y el futuro en un lugar, y esas mismas divisiones del tiempo correspondientes a otros lugares. Por otro lado, la consideración de la estructura discreta del tiempo microcósmico parece imponer la necesidad de establecer el cuanto de duración, o sea, un intervalo temporal mínimo para que puedan realizarse las interacciones entre los procesos. Más aún, parece plantearse la posibilidad de que la magnitud de ese cuanto de duración tenga valores diferentes en los distintos niveles de la existencia microcósmica. Por último, tenemos que los nexos entre todos los lapsos del tiempo microcósmico, se manifiestan destacadamente en las propiedades del monocronismo, el policronismo, el heterocronismo, el homocronismo, el isocronismo y el anisocronismo de los procesos microcósmicos. Y los vínculos indisolubles que existen entre tales propiedades y las que exhibe de manera correspondiente el espacio microcósmico, sirven de base para la formulación de la *cronotópica* o teoría de las transformaciones irreversibles, asimétricas y discontinuas del espacio-tiempo.

ING. ADAN RAMOS BAUTISTA
UNAM 0 OCT 2003 CAMPUS ACATLAN
GEOTECNIA

IV

LA CATEGORÍA DE ENERGÍA

28. *Caracterización de la energía*

Entre todos los conceptos que la ciencia ha establecido para representar las propiedades de los procesos existentes, la categoría de energía es sin duda el más importante y, a la vez, el más útil. No sólo ha desempeñado, y sigue desempeñando, un papel primordial en el desarrollo teórico y experimental de la ciencia, sino que también corresponde a la propiedad física que ha tenido y tiene mayor influencia en el desenvolvimiento de la vida humana en todos sus aspectos. En cierto sentido, dicho desenvolvimiento se podría clasificar históricamente en cuatro etapas —sin que eso signifique el que se excluyan mutuamente—, de acuerdo con las peculiaridades del aprovechamiento humano de la energía. Tales etapas serían: la de la energía muscular, tanto del hombre mismo como de los animales domesticados; la de la energía térmica, obtenida de la leña, el carbón de piedra y el petróleo; la de la energía hidráulica, transformada en otras varias formas de energía; y la de la energía nuclear, que es la etapa en cuyo comienzo nos encontramos ahora. En realidad, el germen de la noción de la energía se pierde en la más remota antigüedad de la historia del hombre. Desde un principio, a la vez que el hombre empezó a desarrollar su propia existencia por medio de su trabajo, aprendió igualmente que la vida humana es imposible sin el trabajo. Más tarde, descubrió el modo de disminuir el esfuerzo invertido al trabajar —o, lo que es lo mismo, descubrió la manera de aumentar el efecto del esfuerzo realizado— utilizando para ello algunos artefactos mecánicos como la palanca y el plano inclinado. Asimismo, aprendió a acumular su esfuerzo muscular para poder emplear después una fuerza de mayor magnitud, en el momento oportuno y con un

propósito definido, como ocurre con la invención y la utilización de la honda y el arco. En rigor, con la palanca logró el hombre multiplicar su fuerza en el espacio; mientras que con el arco consiguió multiplicar su fuerza en el tiempo. Luego, el hombre pudo utilizar también algunas fuerzas de la naturaleza, como el fuego y los animales, para ampliar enormemente los resultados del esfuerzo puesto en el trabajo. En fin, en el curso de su desenvolvimiento histórico, el hombre fue encontrando otras fuentes de energía más poderosas y ricas y, a la vez, fue descubriendo modos cada vez más eficaces de aprovecharla y de transformarla convenientemente. De estas maneras, el hombre comenzó a entrar en posesión consciente de la energía y consiguió imponer su dominio creciente sobre ella.

29. *Determinación científica del movimiento*

Con el surgimiento y la evolución de su actividad científica, el hombre ha podido comprobar que la propiedad más general, a la vez primaria y fundamental, del universo es el movimiento; ya que todos los procesos que lo constituyen, lo mismo que las partes de esos procesos y su conjunto total, se encuentran en movimiento. Esto es, que el universo existe en movimiento o, todavía dicho de otro modo, que la forma primordial de la existencia objetiva es el movimiento. Pues bien, para representar y estudiar el más simple de los procesos en movimiento, a la vez que los movimientos más sencillos, se formuló en la física el concepto de partícula material. Esta partícula material abstracta es considerada como carente de dimensiones espaciales, al igual que un punto geométrico, pero ocupa cierta posición en el espacio y puede cambiar esa posición con el tiempo. El cambio de posición de la partícula material es un desplazamiento, que es el más simple de los movimientos. El ritmo en que la partícula material cambia de posición espacial en el tiempo, es su velocidad. Y la relación en que la velocidad de la partícula material varía con el tiempo, es su aceleración.

Contando con estos elementos conceptuales, se pudieron representar también en la física los otros movimientos mecánicos de la partícula material. Igualmente, fue posible representar así los movimientos de los procesos mesocósmicos, considerándolos como sistema de partículas materiales. De esta manera se desarrolló la cinemática, o sea, la ciencia que estudia abstractamente el movimiento, como el más simple de los cambios espacio-temporales, pero sin atender a las causas que lo provocan y lo modifican; es decir, de modo semejante a como la geometría euclidiana se ocupa de estudiar las propiedades espaciales, haciendo abstracción del tiempo.

Pero, el movimiento es eminentemente dinámico y, por lo tanto, es producido por ciertas causas y, a la vez, es causante de determinados efectos. Esto es, que el movimiento se produce por la acción de algunas fuerzas y trae por resultado el que se efectúen cambios en dicha acción. Entonces, la cinemática es ampliada en otra rama de la física, la dinámica, en la cual se consideran las fuerzas que producen el movimiento o que se oponen a éste. Como consecuencia, aunque siempre manteniendo la abstracción de su carencia de dimensiones espaciales, a la noción de partícula material se le agrega la propiedad de tener una masa inercial, que se contrapone a las fuerzas externas que tratan de impulsarla al movimiento, o mejor dicho, a un cambio en su movimiento. Con estas consideraciones nos encontramos ya en el dominio de la mecánica clásica propiamente dicha. Ahora bien, en todo movimiento se muestran dos aspectos opuestos: la acción o impulso, y la reacción o resistencia. En rigor, el movimiento se manifiesta como resultante del conflicto entre la acción y la reacción; y, así, hasta el reposo de un proceso viene a ser sencillamente un caso particular del movimiento, que se produce como resultado del equilibrio entre la acción y la reacción. La resistencia o reacción es lo que se denomina masa o aspecto positivo; mientras que el impulso o acción es llamado fuerza, que viene a ser la manifestación elemental de la energía. Sólo que ambos

aspectos son inseparables y, además, se intercambian entre sí y se transforman recíprocamente uno en otro. La masa ejerce presión y, por consiguiente, se muestra como fuerza. Análogamente, la fuerza llega a colocarse en condiciones de oponerse al movimiento y, en este sentido, se manifiesta como masa resistente. Por otra parte, como es sabido, Einstein descubrió la proporción en que la masa y la energía se convierten mutuamente una en otra, y viceversa. Dicha relación quedó expresada en su famosa ecuación: $E = mc^2$; en donde E es la energía, m la masa y c la velocidad de la luz. Entonces, entre la masa y la energía de un proceso hay una relación tal que, un aumento en la energía se puede obtener a costa de la transformación de una porción de su masa y, recíprocamente, la masa puede incrementarse por la conversión de una parte de su energía. Pero, como la velocidad de la luz tiene un valor de 300 000 km/seg, en números redondos, entonces resulta que, mientras la energía crece de esta manera en proporción de 9×10^{20} veces la masa,[1] en cambio, la masa aumenta en la relación de 11×10^{-22} veces la energía.[2]

30. *La energía mecánica*

En la física, la masa de los procesos se define estableciendo que la relación entre las masas de dos cuerpos que se encuentran en interacción es igual a la razón inversa de las aceleraciones resultantes en ellos por dicha interacción. Tomando como unidad la masa de un cierto proceso es posible determinar, al menos en principio, la masa de cualquier otro proceso del universo. Con esta manera de determinar cuantitativamente la masa y teniendo en cuenta el hecho de que toda acción produce una reacción igual y contraria, se establece la definición cuantitativa de la fuerza, como el producto de la masa por la aceleración. Como

[1] Esto es, en la proporción de 900 000 000 000 000 000 000 veces la masa.

[2] Así una unidad de masa se convierte en 0.00000000000000000011 unidades de energía.

ya lo dijimos antes, la concepción de la energía se formó históricamente a partir del trabajo. Y, en efecto, transladando la noción del trabajo a la física y considerándolo cuantitativamente, viene a ser simplemente la medida de lo que puede llamarse el efecto espacial de una fuerza sobre un proceso. Así, por ejemplo, el trabajo ejecutado por una fuerza al actuar sobre un cuerpo y haeerlo que se desplace, se define como el producto de la fuerza por la longitud del desplazamiento. Si consideramos dos partículas *A* y *B,* entre las cuales se ejerce mutuamente una fuerza, tenemos que *A* actúa sobre *B* con una fuerza que es igual y opuesta a la que *B* ejerce sobre *A*. Si se aplica la ley newtoniana del movimiento a cada una de estas partículas, según la cual la fuerza es igual al producto de la masa por la aceleración, entonces se puede calcular fácilmente el trabajo ejecutado por la fuerza mutua, cuando las partículas se mueven relativamente entre sí. En general, para un cierto intervalo de tiempo, ese trabajo no es el mismo para las dos partículas, ya que su desplazamiento dependerá de la magnitud de sus masas respectivas. Y como lo más común será que las partículas tengan masas diferentes, entonces su comportamiento será distinto, ya que tendrán aceleraciones y velocidades diferentes. Sin embargo, si se suman las expresiones del trabajo correspondiente a cada partícula, haciendo una reordenación algebraica sencilla se obtiene un resultado sorprendente, puesto que, a pesar de la complejidad que puedan tener los movimientos de las partículas, existe una expresión bien definida que permanece constante durante dichos movimientos y que incluye la posición espacial, la velocidad, la masa y la fuerza de ambas partículas. Y lo mismo ocurre para el caso de que se trate de más de dos partículas y, en general, para un número cualquiera de partículas. Por grande que sea el número de partículas, dicha expresión permanecerá constante. Esta invariante del movimiento es lo que se denomina, en la física, energía mecánica. En rigor, dicha energía consta de dos partes: la energía cinética, que depende de la masa

y la velocidad de cada partícula; y la energía potencial, que depende de las posiciones de las partículas.

Adoptando otro enfoque importante, podemos advertir que el movimiento muestra también dos aspectos opuestos: la atracción y la repulsión. En sentido estricto, el movimiento es el resultado de la oposición entre la atracción y la repulsión. Así, por ejemplo, el movimiento de los planetas en sus órbitas de revolución alrededor del Sol, es sencillamente el resultado del equilibrio dinámico establecido entre dos fuerzas opuestas: la atracción o fuerza centrípeta que el Sol ejerce sobre los planetas, como consecuencia de la gravitación universal; y la repulsión o fuerza centrífuga que los planetas ejercen por su parte, debido al movimiento de rotación de su masa. En este caso de oposición entre aspectos del movimiento, la atracción es lo que se llama propiamente fuerza, porque representa el aspecto pasivo; en tanto que la repulsión es denominada energía, porque es el aspecto que más se hace notar en su actividad. Esto se muestra claramente en las condiciones en que vive el hombre en la Tierra, en donde la atracción gravitatoria del Sol predomina hasta el punto de que únicamente se percibe cuando se manifiesta alguna repulsión particular y transitoria. Por otro lado, cuando un movimiento cualquiera se transfiere de un cuerpo a otro, se le considera como activo, en tanto que se transmite y es causa del otro movimiento. O sea, dicho de otra manera, que es activo en cuanto produce movimiento en el otro cuerpo. Pero, simultáneamente, en tanto que es transmitido, el mismo movimiento es pasivo y su causa, que es el movimiento activo, se muestra como energía, de la cual el movimiento pasivo es considerado como una manifestación. No obstante, la energía es exactamente de la misma magnitud que su manifestación, ya que se trata simplemente de dos aspectos de uno y el mismo movimiento.[3]

[3] F. Engels, *Dialéctica de la naturaleza*, México, Editorial Grijalbo, 1961, pp. 47-62.

31. *La medida del movimiento*

En el siglo XVII se inició una famosa controversia acerca de cuál era la relación entre magnitudes físicas que debería ser considerada como medida del movimiento. Descartes sostuvo que la cantidad de movimiento total que existe en el universo es constante. Como se sabe, la cantidad de movimiento se define cuantitativamente como el producto de la masa de un cuerpo por su velocidad, o sea, por mv, en donde m es la masa y v la velocidad. Más aún, Decartes estimó que todos los cambios que ocurren en los procesos son resultado de las transferencias de cantidad de movimiento de unas partículas a otras, cuando existe interacción entre ellas. Por ende, para Descartes, la verdadera medida de la fuerza se encuentra en el cambio de la cantidad de movimiento producido en un tiempo dado. De este modo, Descartes formuló por primera vez el principio de conservación de la cantidad de movimiento.[4] Sin embargo, dicha formulación era imprecisa, porque Descartes consideraba a la velocidad como un escalar —esto es, como un simple número con magnitud— sin advertir que también tiene dirección y sentido y que, por lo tanto, es un vector.

En 1668, la *Royal Society* de Londres organizó una encuesta sobre este problema de la medida del movimiento. John Wallis aportó la justa observación de que era necesario considerar a las velocidades opuestas con signos contrarios, con lo cual introdujo la estimación de los dos sentidos que puede tener la velocidad en una misma dirección. Christian Huygens, por su parte, demostró correctamente que no sólo la suma de las cantidades de movimiento tiene el mismo valor —considerando ya en el producto mv los dos signos $+$ y $-$ que puede tener la velocidad— antes y después de un choque perfectamente elástico entre dos o más cuerpos, sino que también

[4] R. Descartes, *Lettres*, París, 1659, vol. II, Carta 91.

es constante la suma de los productos de las masas respectivas por lo cuadrado de las velocidades de que están animadas, esto es, la suma de los productos mv^2 correspondientes. Además, Huygens utilizó el principio galileano de relatividad, para la transformación de un sistema de referencia en otro que se mueve con velocidad uniforme respecto al primero.[5] Con la introducción de estas acertadas consideraciones de Huygens, se tuvieron realmente los elementos suficientes para poder resolver el problema de la medida del movimiento.

Newton encontró que el ritmo de cambio de la cantidad de movimiento linear de una partícula material, por unidad de tiempo, es igual a la fuerza que actúa sobre dicha partícula. Y de aquí, tomando en cuenta también una de las leyes del movimiento formuladas por el propio Newton —la de que las fuerzas que se ejercen entre dos partículas materiales son iguales y opuestas— llegó a establecer que las interacciones ejercidas entre un número cualquiera de partículas materiales no cambian nunca la cantidad de movimiento total de un sistema, con tal que éste no se encuentre sometido a fuerzas extrañas al mismo sistema.[6] Para calcular la cantidad de movimiento total, Newton tomó justamente a dicha magnitud física como un vector y, en consecuencia, sumó vectorialmente las cantidades de movimiento particulares. En este caso, en vez de considerar a la fuerza como el producto de la masa por la aceleración, la igualó con el ritmo de cambio de la cantidad de movimiento; lo cual viene a ser equivalente, si la cantidad de movimiento es considerada como el producto de la masa por la velocidad. Esta formulación newtoniana de la ley de conservación de la cantidad de movimiento constituye una expresión tan profunda y objetiva, que ha resultado consecuente con la física relativista y con la mecánica cuántica; mientras que la otra

[5] E. Mach, *Science of Mechanics,* Chicago, The Open Court Publishing Co., 1907, pp. 148, 250, 270-276.

[6] I. Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica,* Londres, Royal Society, 1687, Axiomas o Leyes del Movimiento.

formulación solamente mantiene su validez dentro del dominio de la física clásica.[7]

Leibniz fue el primero en llamar la atención acerca del producto de la masa por el cuadrado de la velocidad, o sea, mv^2, al cual dio el nombre de *vis viva* (fuerza viva) y que viene a ser el doble de lo que después se llamó energía cinética.[8] G. G. Coriolis fue quien redujo después ese valor a $\frac{mv^2}{2}$; y Johannes Bernoulli fue el primero en utilizar la palabra *energía,* aunque su empleo se vino a generalizar hasta más tarde.[9] Según Leibniz, la genuina medida de la eficacia de una fuerza es precisamente dicha *vis viva.* Esta divergencia con Descartes fue la que dio lugar a la larga y apasionada polémica a que antes nos referíamos, entre los leibnizianos y los cartesianos, en torno al problema de saber cuál era la medida correcta de la fuerza ejercida por el movimiento. En realidad la disputa entrañaba una confusión terminológica, provocada por la ambigua significación que se daba entonces al concepto de *fuerza.* Algún tiempo después, D'Alembert pudo resolver la controversia,[10] demostrando que el efecto acumulativo de una fuerza se puede medir tanto por su efecto integrado sobre el tiempo —o sea, por el cambio que produce en la cantidad de movimiento [11]—, como por su efecto integrado sobre el espacio —es decir, por el cambio que produce en la energía cinética.[12] Entonces, ambas

[7] Esta limitación quedó demostrada experimentalmente por la deflexión que sufren los electrones que se mueven a velocidades comparables a la de la luz. Véase Uhlenbeck y Goudsmit, *Nature, 117,* 1926, p. 264; Bichowsky y Urey, *Proc. Nat. Acad. Sci., 12,* 1926, p. 80.

[8] G. W. Leibniz, "Demonstratio erroris memorabilis cartesii", *Acta Eruditorum,* 1686.

[9] Mach, *op. cit.,* pp. 191-192.

[10] J. R. D'Alembert, *Traité de Dynamique,* París, 1743.

[11] Dimensionalmente, la cantidad de movimiento (en unidades *cgs,* centímetro por gramo entre segundo, cgs^{-1}) es igual a la fuerza (centímetro por gramo entre segundo al cuadrado, cgs^{-2}) multiplicada por el tiempo (segundo, *s*).

[12] También desde el punto de vista dimensional, en el mismo sistema *cgs* de unidades, la energía (centímetro al cuadrado por gramo entre segundo al cuadrado, c^2gs^{-2}) es igual a la fuerza (centímetro por gramo

medidas del movimiento resultan ser igualmente válidas, pudiéndose escoger una o la otra, de acuerdo con la pertinencia del problema concreto que se trate de resolver.[13]

Desde un punto de vista moderno, el problema crítico que surgió en la controversia acerca de la medida del movimiento, fue el de decidir cuál era el principio fundamental para explicar todos los procesos físicos: si el principio de conservación de la cantidad de movimiento, o el principio de conservación de la energía. En cierto modo, dentro del dominio de la mecánica, el principio que acabó por triunfar fue el de conservación de la cantidad de movimiento, puesto que se cumple estrictamente en todas las interacciones de los procesos, ya se trate de las dimensiones macrocósmicas, de las comparables al hombre o de las microcósmicas. Pero, al mismo tiempo, el principio de conservación de la energía es el que ha permitido explicar justamente la naturaleza de las fuerzas que intervienen en dichas interacciones y, lo que es más, este principio ha superado los límites de la consideración mecanicista y ha mostrado su vigencia en todos los campos de la física y en todos los niveles de la existencia. A la vez, al generalizarse la concepción de la energía a la física entera, por imposición de la realidad objetiva, se descubrieron otras formas de energía —térmica, eléctrica, magnética, luminosa, radiante en general, nuclear, etc.— que son diferentes a la energía cinética y a la energía potencial de la mecánica. Por otra parte, también se ha descubierto que todas las distintas formas de energía se transforman mutuamente unas en otras, en relaciones equivalentes que han sido determinadas con toda exactitud. De este modo, no solamente se conserva objetivamente la energía, sino que las diversas formas de su existencia se convierten recíprocamente unas en otras.

entre segundo al cuadrado, cgs^{-2}) multiplicada por la longitud (centímetro, *c*).

[18] Engels, *Dialéctica de la naturaleza*, pp. 69-77.

32. *Conservación y transformación de la energía*

De acuerdo con la física contemporánea, podemos decir que en todos los procesos del universo existe una propiedad a la que denominamos energía, que puede ser considerada como la capacidad para producir efectos y la cual tiene la peculiaridad de que, aunque se presenta en varias formas y es susceptible de transformarse mutuamente entre todas ellas, sin embargo, su cantidad total no aumenta ni disminuye y, por lo tanto, siempre se conserva constante. En el caso de la energía mecánica, su efecto es la ejecución de un trabajo; en el caso de la energía electromagnética, su efecto es un flujo de energía electromagnética; en el caso de la energía térmica, su efecto es la transmisión de calor; y así sucesivamente.[14] Por lo demás, como cada forma de energía es susceptible de convertirse en cualquiera otra de sus formas, resulta que, de un modo directo o indirecto, cada una de las formas de energía es capaz de producir todos esos efectos de manera equivalente. En fin, como la masa y la energía se transforman también mutuamente, en la proporción expresada por la ecuación de Einstein: $E = mc^2$, tenemos que la energía produce igualmente los efectos de la masa y, viceversa, que la masa es capaz de transferirse convertida en energía y manifestándose en alguna de sus formas.

Aquí cabe hacer una advertencia sumamente importante, para evitar dos errores que se cometen con frecuencia. En primer lugar, no se debe confundir la masa con la materia, ya que, en todo caso, la masa es solamente una de las muchas propiedades de la materia, esto es, de la existencia objetiva. Por consiguiente, resulta ser una interpretación insostenible la que se hace al hablar de que "la materia desaparece", cuando ocurre una conversión de masa en energía. En realidad, la energía es tan material como la masa, ya que es simplemente otra de las muchas propiedades de la materia y, por lo tanto, todas sus mani-

[14] M. Planck, *General Mechanics*, p. 76.

festaciones son tan objetivas y susceptibles de experimentación, como lo son las manifestaciones de la masa. Además, nunca se debe olvidar que la conversión descubierta por Einstein es recíproca y, en consecuencia, que la energía también se transforma en masa, sin que por ello se pueda decir tampoco que "desaparece". En fin, también es indispensable tener en cuenta que los procesos siempre poseen masa y energía, de tal manera que la transformación de una en otra nunca es exhaustiva, sino que siempre se mantiene cierta cantidad de masa y determinada cantidad de energía que no se convierten; y, todavía más, generalmente sólo una pequeña parte de la masa es la que se transforma en energía, y viceversa. Por otro lado, aún cuando existen diversas formas de energía, no por ello hay que atribuir a cada proceso existente una forma particular de energía para poder explicarlo, ni menos hay que considerar nunca alguna especie de energía cuya existencia se supusiera aparte de la materia. Porque, si se multiplica innecesariamente el número de formas de energía o se postulan energías "inmateriales", no sólo se procede con plena arbitrariedad subjetiva y falaz, sino que se abandona definitivamente el terreno de la explicación científica. Por todo esto, lo que realmente preocupa al científico es investigar con el mayor rigor, tanto teórica como experimentalmente, todos y cada uno de los procesos existentes, hasta descubrir objetivamente la forma de energía, o la conjugación de varias formas de energía con sus consiguientes transformaciones recíprocas, que produce efectivamente los movimientos y los cambios de dichos procesos, por complejos que éstos sean. De otra manera, cuando se inventan formas de energía inexistentes o supuestamente desligadas de la materialidad de los procesos, lo que se consigue es apartarse en definitiva de la objetividad y la racionalidad objetiva, para caer de lleno en la especulación sin fundamento.

33. *Entropia y anentropia*

Como ya lo hemos expuesto, la segunda ley de la termodinámica establece la existencia de una propiedad común a los cambios de estado de los procesos, conocida con el nombre de *entropia,* la cual puede ser considerada como la tendencia hacia la desaparición de las diferencias de temperatura, que es el estado más probable entre todos los posibles.[15] La entropia se incrementa con los cambios de estado que son irreversibles, y permanece constante en aquellos cambios que son reversibles. El incremento de la entropia no afecta la constancia cuantitativa de la energía, pero si influye en su capacidad para ejecutar trabajo. Mientras subsisten diferencias de temperatura, es posible que la energía produzca como efecto la ejecución de trabajo; en tanto que esa posibilidad desaparece cuando se alcanza el equilibrio termodinámico. Por ello es que la entropia puede ser interpretada como la sombra de la energía. Entonces, el crecimiento de la entropia significa que el proceso se aproxima al estado de equilibrio termodinámico, que es a la vez el estado más probable, porque puede realizarse en un número mayor de maneras diferentes. Por lo tanto, la entropia se encuentra vinculada directamente con la probabilidad y ambas tienden, naturalmente, a incrementarse en una proporción logarítmica; de tal modo que su relación queda expresada por la ecuación de Boltzmann-Planck.[16] En consecuencia, la entropia viene a ser la medida de la probabilidad de que un proceso se encuentre en un estado determinado. Sin embargo, es indispensable no perder nunca de vista que la entropia es una propiedad que solamente existe a partir del nivel de los procesos termo-

[15] M. Planck, *Treatise on Thermodynamics,* p. 106.

[16] Dicha ecuación es: $S = k \log P$, en donde S es la entropia del proceso, k la constante de Boltzmann y P la probabilidad termodinámica, o sea, el número total de estados elementales del proceso.

dinámicos y que, por otra parte, aún en ese caso, su crecimiento no es absoluto, como lo demuestra la tercera ley de la termodinámica.[17]

En los cambios reversibles, se mantiene constante el grado o capacidad de la energía para ejecutar trabajo. Pero, en los cambios irreversibles, se produce una degradación o descenso en el grado de la energía. Este grado de la energía se puede expresar con precisión haciéndolo corresponder con la entropia negativa o *anentropia.*[18] Entonces, tenemos que la anentropia representa la tendencia de la energía hacia la conservación de su capacidad para producir toda suerte de efectos. Por lo tanto, dentro de un proceso que se mantiene en desequilibrio termodinámico, la anentropia permanece constante. En tanto que, cuando en el proceso se producen cambios de estado que lo aproximan al equilibrio termodinámico, entonces la anentropia decrece. Y, cuando se acentúa el desequilibrio termodinámico o la temperatura del proceso disminuye indefinidamente, entonces la anentropia se incrementa. De este modo, la anentropia representa una cualidad activa de la energía. La anentropia es también una medida del orden o de la organización que posee un proceso. En este sentido, la cualidad distintiva de los procesos orgánicos es su mayor orden. Así, los organismos vivos están absorbiendo continuamente del medio ambiente el orden que necesitan para mantener su vida. En los animales, ese orden es tomado de la anentropia de los compuestos orgánicos más o menos complejos que les sirven de alimento. Después de haber utilizado buena parte de la anentropia de esos compuestos orgánicos, los animales los devuelven al medio ambiente en forma degradada; pero todavía así contienen anentropia suficiente para ser aprovechada por los vegetales. Por lo tanto, los organismos vivos evitan la muerte abasteciéndose continuamente de anentropia. Y su metabolismo consiste propiamente en

[17] Véase su enunciado en la Sección 23, nota 27 del Capítulo III.
[18] Mejor que la palabra híbrida *negentropia.*

liberarse de la entropia que producen, adquiriendo en cambio de ella la anentropia que necesitan.[19]

34. *Principios de conservación*

La tarea primordial de la física consiste en descubrir las leyes generales del universo y en expresarlas de manera racional y objetiva, para poder fundar sobre ellas la explicación de los procesos físicos conocidos experimentalmente y anticipar hipotéticamente la existencia de otros procesos y su comportamiento. Ahora bien, entre las leyes generales más profundas y de más simple expresión, tenemos los principios que establecen la conservación de algunas de las propiedades universales de los procesos existentes. Por ello, la indagación de la constancia en la magnitud total de ciertas propiedades físicas es una preocupación legítima que tiene gran importancia para los investigadores científicos; y, algunas veces, a esa preocupación se ha debido el que se adquiera tempranamente la convicción de que la cantidad total de alguna propiedad física determinada se mantiene constante, como ocurrió, por ejemplo, en el caso de la carga eléctrica. Sin embargo, para que un principio de conservación se convierta efectivamente en una ley de la física, es enteramente indispensable que su postulación sea verificada de un modo incontrovertible a través de la experimentación; como finalmente se logró hacer respecto a la conservación de la carga eléctrica. De manera correspondiente, también la refutación experimental es lo único que puede llevar a demostrar el incumplimiento o la limitación de un principio de conservación, como ha sucedido recientemente con la falla de la conservación de la paridad y la violación de la invariancia ante la conjugación de la carga eléctrica en las interacciones débiles de las partículas elementales, puestas al descubierto por los trabajos de Yang y Lee.[20]

[19] E. Schroedinger, *¿Qué es la vida?*, Buenos Aires-México, Espasa-Calpe, 1947, pp. 96-108.

[20] Véase Yang C. N. y Lee T. D., *Simetría y paridad.*

En la física contemporánea, las leyes de conservación han adquirido una importancia todavía mayor de la que tenían en la física clásica, debido principalmente al hecho fundamental de que se ha probado que su validez se mantiene inalterable en los dominios de la física relativista y la física cuántica, a diferencia de otras muchas leyes de la física clásica que han tenido que sufrir modificaciones radicales para poder ser aplicables a estos nuevos campos del conocimiento o que, sencillamente, carecen de toda validez en dichos niveles de la existencia objetiva. Por otra parte, cada ley de conservación se encuentra conectada en forma indisoluble y recíproca con una ley de simetría o, lo que es equivalente, con un principio de invariancia. Así, por ejemplo, existe una correspondencia objetiva y biunívoca entre la conservación de la cantidad de movimiento linear y la invariancia de las leyes físicas ante una translación espacial. Además, esa conexión entre la simetría y la conservación se ha ampliado notablemente por el hecho de que, mientras en la mecánica clásica únicamente se cumple para las simetrías continuas —como son, por ejemplo, la translación, la rotación y las transformaciones de Galileo y de Lorentz—, en cambio, en la mecánica cuántica dicha conservación también tiene cumplimiento para las simetrías discretas —como la reflexión espacial y la inversión temporal.[21]

Considerando el dominio entero de la física —o sea, los niveles macrocósmico, mesocósmico y microcósmico— tenemos que, fundamentalmente, existen tres leyes de conservación: el principio de inercia, que implica la conservación de la cantidad de movimiento linear; el principio de conservación de la energía, a través de la transformación mutua entre todas sus formas de existencia; y el principio de conservación de la cantidad de electricidad. También existen otras dos leyes de conservación, que son: el principio de conservación de la cantidad de movimiento angular; y el principio de conservación de la masa inercial. Pero, la primera de estas dos últimas leyes resulta ser, en

[21] Con las salvedades indicadas en la Sección 14.

cierto modo, una consecuencia directa del principio de conservación de la cantidad de movimiento linear; ya que la cantidad de movimiento angular es el momento de la cantidad de movimiento linear. Más aún, si consideramos conjuntamente la translación y la rotación, que son los movimientos elementales desde el punto de vista espacial, entonces ambas leyes quedan conjugadas en el principio de conservación de la cantidad de movimiento, tanto angular como linear. Por su parte, con el descubrimiento de la conversión mutua entre la masa y la energía, la ley de conservación de la masa inercial ha quedado incluida dentro del principio más general de la conservación y la transformación de la energía y la masa. Por otro lado, en la física relativista, se han fundido en una sola ley los principios de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento. En fin, en el dominio de la física cuántica tenemos otros principios de conservación, como son los que establecen la conservación de la paridad,[22] la conservación de las partículas pesadas o bariones, la conservación del espín isotópico y la conservación de las partículas livianas o leptones; cuyo verdadero carácter y alcances son estudiados intensamente en la actualidad, tanto en forma teórica como experimental.

En el caso de los procesos microcósmicos, son bien conocidas las graves dificultades que surgen cuando se trata de prever con exactitud el comportamiento individual de las partículas elementales. En general, la teoría cuántica "ortodoxa" sólo permite determinar con cierto rigor —y en eso radica una de sus mayores insuficiencias, aunque no es la única— el comportamiento de grandes conjuntos de partículas, estableciendo para ese efecto las probabilidades correspondientes a los diversos resultados que son posibles. Sin embargo, hay algunas leyes físicas que si permiten establecer con entera precisión el comportamiento de las partículas elementales de manera individual. Y entre esas leyes se encuentran justamente los principios de conservación. Debido a este cumplimiento universal que

[22] Véase la Sección 14.

tienen las leyes de conservación, en todos los niveles de la existencia, es por lo que uno de los criterios para juzgar acerca de la estructura lógica de cualquier teoría física nueva, consiste precisamente en indagar si dicha teoría es consecuente con los principios de conservación y, particularmente, con la ley de la conservación y la transformación de la energía y la masa. No obstante, es necesario aclarar que la aplicación de este criterio científico es algo completamente diferente a lo que significa la adopción de la infundada "concepción energética" de Ostwald.[23] En realidad, los principios de conservación, como todas las leyes científicas, tienen el carácter de teorías generales comprobadas y, por consiguiente, son los fundamentos en los cuales se apoya toda la estructura de los conocimientos adquiridos. Pero, en todo caso, respecto a las nuevas investigaciones, las leyes científicas mantienen su carácter de postulados elementales por verificar, aunque estén apoyadas en su comprobación reiterada y sin excepciones en todos los conocimientos anteriores. Y solamente cuando se consigue comprobar experimentalmente que dichas leyes también se cumplen en los conocimientos nuevos, es que se convierten también en fundamentos de esos nuevos conocimientos. Unicamente con estas exigencias rigurosas es como se asegura la objetividad de los resultados logrados en la experimentación y en el desarrollo teórico de la ciencia.[24]

35. *La inercia de la energía*

Cuando una carga eléctrica se desplaza, el movimiento del campo eléctrico correspondiente produce el surgimiento de un campo magnético y, entonces, su coexistencia trae aparejado un flujo de energía y una cantidad de movimiento adicional. Cuando el proceso satisface ciertas con-

[23] W. Ostwald, *Vorlesungen über Naturphilosophie*, Leipzig, 2ª ed., 1902, p. viii.

[24] Sobre la función que desempeñan los postulados y los fundamentos en la ciencia, puede verse De Gortari, *Introducción a la lógica dialéctica*, pp. 32-38.

diciones de simetría —por ejemplo, cuando se trata de una esfera—, entonces la energía y la cantidad de movimiento quedan representados por dos vectores que son paralelos al vector que representa a la velocidad. De este modo, nos encontramos con la existencia de la *inercia de la energía electromagnética,* ya que su efecto es enteramente semejante al producido por la inercia de la masa, o sea, que la cantidad de movimiento adicional implica ineludiblemente una masa inercial adicional. En el caso de un proceso mesocósmico, dicha masa adicional es despreciable en comparación con la magnitud de su masa en reposo, en relación con todas las cargas que son manejables experimentalmente. Pero, cuando se trata de una partícula elemental —como un electrón, por ejemplo, que puede ser considerado en ciertos respectos como una esfera rígida—, entonces esa masa adicional resulta ser del mismo orden de magnitud de su masa en reposo. En 1903, Max Abraham encontró que la cantidad de movimiento debida a la energía electromagnética es proporcional a la velocidad,[25] aunque esto se refiere solamente al caso de que se trate de velocidades relativamente pequeñas; en cambio, dicha cantidad de movimiento aumenta mucho más rápidamente —y, de hecho, sin límite alguno— a medida que la velocidad del electrón se aproxima a la velocidad de la luz. Este resultado puso en crisis la estructura básica de la mecánica clásica, planteando la necesidad de establecer una nueva teoría, que fue justamente la teoría de la relatividad. Einstein, en 1905, puso al descubierto la relación fundamental existente entre la masa m y la energía E, conduciendo así al reconocimiento de que todas las formas de energía poseen inercia.[26] Al determinar la inercia de la energía, la teoría de la relatividad estableció la conjugación entre la densidad de la energía, el flujo de energía y la densidad de la cantidad de movimiento, en una sola magnitud física que se expresa matemática-

[25] M. Abraham, *Wied. Ann., 10,* 1903, p. 105.

[26] A. Einstein, "Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?", *Ann. d. Physik, 18,* pp. 639-641.

mente por medio del tensor energía-cantidad de movimiento. De esta manera fue como quedaron fundidos en una sola ley los principios de conservación de la cantidad de movimiento y de conservación de la energía. Y la validez de esta fusión, que fue lograda primero teóricamente recurriendo al principio de relatividad, ha sido verificada después a través de la experimentación.

La ley generalizada de la inercia de la energía implica necesariamente el tener que reconocer, por un lado, que la masa y la energía son dos formas diferentes e inseparables, en las cuales se manifiesta la existencia de los procesos objetivos. Y, por otra parte, significa que la cantidad de movimiento y el flujo de energía son igualmente dos aspectos distintos e indivisibles de un mismo modo de existencia de dichos procesos. Así, tanto la masa como la energía han dejado de ser categorías independientes de la física, para quedar sintetizadas en la nueva categoría de energía-masa, la cual es mucho más rica en contenido que la suma de todas las propiedades de la masa y de todas las características de la energía en sus diversas formas. En particular, la concepción de la energía se ha ampliado enormemente como resultado de su conjugación dialéctica con la masa. Desde luego, no obstante que hay algunas razones plausibles para considerar que tal vez no conozcamos todavía todas las formas en que existe la energía, el hecho es que, independientemente de esa posible ignorancia, en la actualidad podemos determinar la cantidad total de energía que posee un proceso físico, partiendo de la magnitud de su masa. Por lo tanto, ha desaparecido la exigencia de tener que fijar arbitrariamente un punto cero para la energía, cosa que la concepción anterior obligaba a introducir; resultando, entonces, que ya no se consideran meramente diferencias de energía, como antes ocurría, sino que la energía representa una magnitud física bien determinada.[27] Ahora bien, teniendo en cuenta

[27] A. D. Alexandrov, *Examen de la teoría de la relatividad restringida*, México, U.N.A.M., Suplementos del Seminario de Problemas Científicos y Filosóficos, Segunda Serie, Núm. 18, 1959.

las conjugaciones que hemos mencionado, la teoría de la relatividad puede ser interpretada como la teoría que refleja la existencia de la conexión mutua universal entre la masa y la energía. Y, por consiguiente, del mismo modo en que todo proceso posee extensión espacial y tiene duración temporal, así también todo proceso posee una masa en reposo, m_o, y una energía propia, $m_o c^2$, o sea, más precisamente, una magnitud compleja a la cual denominamos *energía-cantidad de movimiento.*

36. *Temporalidad de la energía*

El examen riguroso de las relaciones de incertidumbre de Heisenberg [28] nos ha permitido establecer que la consideración simultánea de las magnitudes representadas por los conceptos de "energía precisamente determinada" y de "instante precisamente determinado", respecto a una y la misma partícula elemental, conduce a la conexión lógica que se expresa por medio de un juicio de incompatibilidad. Por lo tanto, en tal caso existen tres posibilidades: la determinación precisa de la energía, a costa de la determinación precisa del tiempo; la determinación precisa del instante, en detrimento de la determinación precisa de la energía; y la determinación simultánea de la energía y el instante, con la precisión permitida por el límite expresado justamente por la relación de incertidumbre. De otra parte, también tenemos que en una de las ecuaciones primordiales de la mecánica cuántica, la energía E de una partícula elemental queda determinada exactamente por la constante universal de Planck h, multiplicada por la frecuencia ν de su movimiento ondulatorio, o sea, por medio de la relación: $E = h\nu$. Esta ecuación impone la necesidad de operar simultáneamente con la energía y con una propiedad temporal de la misma partícula elemental; ya que la frecuencia viene a ser dimensionalmente el inverso del tiempo. Y esta operación requiere ineludiblemente el tomar valores precisos de ambas mag-

[28] Véase la Sección 18.

nitudes. Sólo que, conforme a la relación de incertidumbre correspondiente, tal cosa es imposible de realizar con precisión respecto a la energía y el tiempo. Así se plantea una paradoja insostenible: de un lado, la imposibilidad de hacer una determinación precisa y simultánea de la energía y el tiempo; de otra parte, la necesidad imposible de eludir de hacer la determinación simultánea y precisa de la energía y la frecuencia, que también es una propiedad temporal.[29]

Ahora bien, como ya lo hemos expuesto, el hecho mismo de que la oposición antes señalada se muestre como irreductible, plantea la necesidad de tratar de superar dialécticamente esa paradoja, con el fin de resolverla. Para eso, tenemos que considerar la energía de una partícula elemental como otra forma en la cual se manifiesta su oscilación o frecuencia ondulatoria y, a la vez, reconocer en la oscilación de su movimiento otra manera en la cual se muestra su energía. Entonces, el tiempo tiene que ser considerado conjuntamente como energía y como oscilación; o bien, dicho de otra manera, es inesquivable el reconocer a la energía y la frecuencia como dos formas, distintas pero inseparables, a través de las cuales se manifiesta una de las modalidades de la existencia de las partículas elementales, a la que denominamos genéricamente como sus propiedades temporales. Por lo demás, la objetividad de esta conjugación entre el tiempo y la energía ya ha sido demostrada antes en el dominio de la física relativista. Como consecuencia, viene a resultar conceptualmente posible y experimentalmente necesario el determinar a la vez con precisión, para una y la misma partícula elemental, la magnitud de su energía y la cantidad de una de sus propiedades temporales. Más aún, la relación lógica entre esas magnitudes la podemos expresar por medio de un juicio de inclusión. Por lo tanto, tendría este enunciado: *Respecto a las partículas elementales, el tiempo se puede manifestar como oscilación, o como energía, o bien, como*

[29] Esto mismo sucede para las otras parejas de magnitudes afectadas por las relaciones de incertidumbre; véanse las Secciones 7 y 9.

oscilación y energía a la vez. De esta manera quedan satisfechas, rigurosamente, tanto la relación de incertidumbre para la pareja conjugada energía-tiempo, como la ecuación que vincula la frecuencia del movimiento ondulatorio con la energía; lo cual es posible, objetivamente, por la coincidencia de la constante cuántica h en ambas expresiones.

37. *Energía interna de los átomos*

Como es sabido, cada átomo constituye un sistema dinámico formado por un núcleo y un cierto número de electrones negativos. El núcleo es una partícula simple únicamente en el caso del átomo de hidrógeno ordinario, y está constituido por varias o muchas partículas en todos los demás casos, desde el deuterio hasta el laurencio. Pero, para muchos efectos, el comportamiento del núcleo se puede considerar como el de una partícula unitaria con carga positiva. Por su parte, el número de electrones del átomo puede ser desde uno hasta 103, coincidiendo justamente con el número atómico del elemento químico al cual corresponda. Incluso en los numerosos casos en que existen diversos isótopos de un mismo elemento, el número de electrones es el mismo y lo que varía es el número de las partículas que forman el núcleo. Dentro del sistema constituido por el átomo, el núcleo permanece casi fijo y los electrones se mueven a su alrededor, describiendo trayectorias bastante complicadas. Como ya lo hemos dicho, dentro de ese sistema se cumplen los principios de conservación de la energía, de conservación de la carga eléctrica y de conservación de la cantidad de movimiento; y, por consiguiente, su energía total permanece constante. Desde el punto de vista mecánico, dicha energía total del átomo está formada por la suma de la energía cinética del núcleo, las energías cinéticas de los electrones y la energía potencial mutua. Sólo que, debido a que la masa del núcleo es muchísimo mayor que la del electrón,[30] resulta que el

[30] La masa del protón es de 1836 y la del neutrón de 1838.6, tomando como unidad la masa del electrón; además, el núcleo puede estar formado hasta por 103 protones y más de 50 neutrones.

centro de gravedad del átomo coincide aproximadamente en todos los instantes con el centro del núcleo. Entonces, como el núcleo casi no se mueve, resulta posible despreciar prácticamente la contribución del núcleo a la energía cinética del sistema atómico. De aquí que se pueda considerar, con gran aproximación, que la energía total del sistema formado por el átomo sea igual a la suma de las energías cinéticas de sus electrones planetarios y de sus respectivas energías potenciales.

Para poder explicar satisfactoriamente los procesos de absorción y de emisión de energía radiante que se producen en el átomo, fue necesario reconocer la existencia de limitaciones en el movimiento de los electrones alrededor del núcleo, de tal modo que únicamente son posibles ciertas órbitas privilegiadas, denominadas órbitas estables o cuánticas, cuyos radios forman una serie infinita de valores discretos. Dicha condición —propuesta originalmente por Bohr, verificada luego experimentalmente y explicada después satisfactoriamente por Sommerfeld [31]— consiste en limitar los radios posibles a aquellos en los cuales la cantidad de movimiento angular del electrón resulta ser un múltiplo entero de la magnitud cuántica $\frac{h}{2\pi}$, en donde h es la constante de Plank y π la conocida relación entre el diámetro y la circunferencia.[32] En el caso del átomo de hidrógeno, la órbita más cercana al núcleo tiene un radio de 0.527×10^{-8} cm; y, tomando este valor como unidad, la serie de los radios posibles para las órbitas es la de los cuadrados de los números naturales,[33] o sea: 1, 4, 9, 16, 25... A cada una de estas órbitas le corresponde una cantidad definida de energía y, por lo tanto, la energía de los electrones sólo puede asumir valores discretos, lla-

[31] Véase la Sección 11.

[32] Como es fácil advertir, se trata de la mitad de la magnitud constante que expresa el límite de la precisión que es posible obtener simultáneamente para las parejas conjugadas, de acuerdo con las relaciones de incertidumbre.

[33] Véase la Sección 48.

mados *niveles de energía.* A su vez, cada uno de estos niveles de energía corresponde a un estado cuántico diferente para el electrón y, como vamos a ver luego, también para el átomo. Por otra parte, la consideración ondulatoria del movimiento de los electrones conduce a poner al descubierto que sus trayectorias dentro del átomo tienen necesariamente longitudes tales que son múltiplos enteros de la longitud de onda de los propios electrones y que, además, conciden precisamente con las órbitas correspondientes a los niveles de energía que resultan posibles cuánticamente. En consecuencia, la localización espacial y temporal de las órbitas electrónicas se encuentra especificada por la cuantización de la cantidad de movimiento angular, la cuantización de la energía y la dimensión finita de la longitud de onda de los propios electrones.

El paso de un electrón de una órbita cuántica a la siguiente, se produce siempre de manera brusca, en la forma de un salto cuántico. Y, como se cumplen los principios de conservación de la cantidad de movimiento y de conservación de la energía, entonces, para que se produzca uno de esos saltos, es indispensable que el átomo absorba o emita la cantidad de energía correspondiente a la diferencia entre los dos niveles en cuestión. Dicha energía es absorbida o emitida en la forma de radiación; habiendo absorción de energía cuando la transición del electrón es de una órbita interna a un nivel externo de mayor energía, y emisión en el caso contrario. Debido a que la masa total del átomo es enorme, comparada con la del electrón, la energía cinética que un átomo puede recibir cuando choca con un electrón libre es enteramente despreciable, respecto al átomo considerado en su conjunto. Por ende, toda la energía transferida al átomo por el choque viene a incrementar su energía interna. Cuando la energía del electrón libre es menor que la requerida para provocar el paso de un electrón atómico a una órbita exterior —esto es, cuando es menor que la energía de resonancia—, entonces el átomo no sufre alteración interna alguna y el electrón libre sale del choque como un cuerpo perfectamente

elástico.[34] En cambio, cuando la energía del electrón libre que choca es un poco mayor que la energía de resonancia, entonces su absorción puede provocar el salto de un electrón atómico a una órbita exterior a su trayectoria básica, haciendo que el átomo deje de encontrarse en un estado estable y pase a un estado de excitación.[35] Tal estado de excitación tiene una duración sumamente breve y termina cuando el electrón excitado vuelve a su órbita estable y el átomo emite la energía correspondiente en forma de radiación. Por su parte, el electrón libre sale despedido del choque con una energía cinética que es menor que la que traía, exactamente en la diferencia entre su energía inicial y la energía de resonancia absorbida por el átomo. De este modo, ocurre como si el electrón hubiera chocado con un cuerpo blando y, por ello, la colisión se llama entonces inelástica.

También puede suceder que la energía cinética del electrón libre que choca con un átomo sea mayor todavía que la antes indicada y, en ese caso, se producen choques inelásticos que hacen que el átomo pase sucesivamente a las siguientes energías de excitación. En tales casos, el electrón libre sale despedido con una energía cinética disminuida exactamente en la cantidad transferida al átomo. Cada tipo de átomo tiene una serie específica y finita de energías de excitación, o sea, que tiene una órbita cuántica determinada como límite exterior. Cuando la energía absorbida por el átomo alcanza ese límite —llamado energía de ionización—, el electrón atómico afectado se desprende del átomo y, como consecuencia, el átomo se convierte en un ión positivo. Entonces, como resultado del choque se tiene un átomo ionizado, además del electrón libre que chocó y del electrón que se desprende del átomo. Además de esta clase de choques, denominados del primer tipo, existe la posibilidad de que se produzcan choques que consisten en el

[34] Esto demuestra que la energía requerida para provocar el salto cuántico no es, con seguridad, el cuanto elemental de energía, ya que existen cantidades menores que dicha energía de resonancia.

[35] E. Persico, *Fundamentals of Quantum Mechanics*, pp. 46-50.

proceso inverso y, por ello, se llaman del segundo tipo.[36] En tales casos, un átomo excitado choca con un electrón libre y, en lugar de transferirle su energía de excitación en forma de radiación, se la traspasa en la forma de energía cinética. Cuando eso sucede, el electrón libre retrocede con una velocidad mayor de la que tenía antes de producirse el choque. Y, por cierto, estos choques del segundo tipo tienen efectos mesocósmicos de gran importancia, ya que cuando una radiación pasa a través de un gas, la energía radiante absorbida por las moléculas del gas las excita, hasta convertirse finalmente en energía cinética molecular —es decir, en calor—, por medio de los choques del segundo tipo que entonces se producen.

38. *Energía de la cohesión molecular*

Las moléculas de las diversas sustancias químicas, tanto las elementales como las compuestas, están formadas por átomos de los distintos elementos en un número característico y con una ordenación estructural también peculiar para cada sustancia. Por lo tanto, los átomos que constituyen una molécula se encuentran unidos firmemente entre sí y se mantienen relativamente estables en la posición que les corresponde dentro de la estructura molecular. Desde el punto de vista mecánico, resulta indispensable que se establezca un equilibrio entre las atracciones y las repulsiones de los átomos componentes, para que se mantenga la estructura de la molécula. De acuerdo con las leyes newtonianas del movimiento y con las leyes del electromagnetismo, las fuerzas que mantienen la cohesión molecular son conocidas con el nombre de fuerzas de valencia.[37] Dichas fuerzas dependen de la capa exterior de electrones que tiene cada átomo. Los otros electrones se encuentran dispuestos en capas internas que, prácticamente, carecen de significación en lo que respecta a las propiedades químicas y fisicoquímicas de los átomos. La

[36] Persico, *op. cit.*, pp. 54-55.
[37] C. A. Coulson, *Valence*, Oxford, Clarendon Press, 2ª ed., 1961.

capa exterior la integran entre uno y ocho electrones y casi siempre está cargada negativamente, o bien, es neutra en el caso de los gases inertes. El número de electrones que constituyen la capa exterior determina también la periodicidad de las propiedades de los elementos químicos. Así, por ejemplo, todos los metales alcalinos tienen un solo electrón en su capa periférica. Cuando dicha capa exterior está completa, se trata del átomo de un elemento químicamente inactivo o gas inerte. En el helio, la capa electrónica superficial está compuesta por 2 electrones; en tanto que en el neón, el argón, el criptón, el xenón y el radón, dicha capa se encuentra formada por 8 electrones.

Debido a la carga negativa que tiene la capa electrónica superficial de los átomos, la acción que se produce entre ellos es repelente. Sin embargo, cuando los átomos se aproximan, se puede producir un intercambio de uno o más de sus electrones exteriores, lo cual provoca un cambio en el signo de la carga de algunos de ellos y, por lo tanto, hace que la repulsión se convierta en atracción. La unión química se realiza mediante el acoplamiento en parejas de los electrones pertenecientes a las capas exteriores de los átomos que forman la molécula. Cada pareja se constituye con electrones de átomos diferentes, de tal manera que cada par ligante o doblete es compartido por los dos átomos. Un solo par representa una unión química simple, dos pares una unión doble, tres pares una unión triple, y así sucesivamente. Al formarse un par ligante, los electrones que lo constituyen se comportan como inertes para el establecimiento de otros enlaces. Así, por ejemplo, en el caso simple del cloruro de sodio, lo que sucede es que un electrón de la capa superficial del átomo de cloro y otro electrón de la capa externa del átomo de sodio forman un doblete. De este modo, los dos átomos se ionizan transformándose en partículas con cargas eléctricas opuestas. Entonces forman así la molécula del cloruro de sodio, cuya cohesión viene a ser un efecto de la atracción electrostática que se produce entre el átomo de cloro y

el átomo de sodio. Cuando se trata de moléculas más complicadas, su cohesión se puede explicar generalmente de manera análoga, aunque con mayor complejidad.[38]

En cambio, el problema es diferente cuando se trata de explicar la interacción que vincula a los dos átomos que constituyen la molécula de hidrógeno, por ejemplo, porque entre dos átomos neutros no puede haber fuerza atractiva, en el sentido newtoniano. En este caso es indispensable recurrir a la diferencia en el estado cuántico de los respectivos electrones. Para dar una idea de esa diferencia, tenemos que traer a cuento el espín de los electrones. Empleando un lenguaje comparativo, podemos decir que las partículas elementales giran como esferas pequeñísimas, unas en un sentido y otras en el opuesto. Dicho movimiento de rotación produce una cantidad de movimiento angular, a la cual se le denomina *espín* y puede tener signos opuestos (+ y —). Cuando los espines de dos partículas elementales son del mismo signo, se dice que dichos espines son paralelos; y, cuando son de signo contrario, tienen espines antiparalelos. Pues bien, la cohesión de los dos átomos que forman la molécula de hidrógeno, se debe al intercambio que se establece entre los estados cuánticos de sus correspondientes electrones, ya que cada átomo de hidrógeno tiene un solo electrón. Por ello, la causa de este efecto se denomina energía de intercambio. Cuando los electrones tienen espines paralelos, la energía de intercambio produce una repulsión y, por ende, no es posible que se forme molécula alguna. Mientras que, cuando los espines respectivos son antiparalelos, entonces la energía de intercambio produce una atracción entre los átomos y, en consecuencia, se forma la molécula de hidrógeno.[39]

En general, los electrones de la capa periférica del átomo tienden a constituirse en cuatro parejas, que pueden ser compartidas o no por otros átomos. Semejante

[38] L. Pauling, *The nature of chemical bond,* Ithaca, Cornell University Press, 3ª ed., 1960.

[39] W. Kauzmann, *Quantum Chemistry,* Nueva York, Academic Press, 1957.

disposición confirma la estabilidad particular que tienen los átomos de los gases inertes, ya que el helio cuenta con una de estas parejas y los otros gases inertes con cuatro parejas, las cuales no admiten ser compartidas con otros átomos. En cambio, en el caso de la molécula diatómica del cloro, tenemos que cada uno de sus átomos cuenta con siete electrones periféricos y, al constituirse la molécula, cada atómo queda rodeado de cuatro parejas electrónicas, siendo una de ellas común a los dos átomos. De esta manera, cada electrón exterior de un átomo que no se encuentra formando pareja, representa una valencia libre de dicho átomo. Pues bien, para que se constituya una molécula es necesario que esos electrones de valencia se unan formando parejas y, entonces, se manifiesta la energía de intercambio. Por lo tanto, la energía de intercambio solamente surge cuando no es nula la probabilidad de que dos partículas elementales de idéntico tipo —como lo son los electrones negativos— se encuentren en el mismo lugar del espacio en el mismo instante. Esto quiere decir que la energía de intercambio únicamente se manifiesta en el caso de que dos partículas de la misma especie tengan dominios de presencia posible que encajen el uno en el otro, o sea, cuando poseen la propiedad de la homotopía.[40] Por otra parte, esa posibilidad de que varias partículas elementales ocupen el mismo lugar al mismo tiempo, se relaciona también con el problema de la carencia de individualidad que muestran dichas partículas y, por consiguiente, se vincula con la imposibilidad existente hasta ahora de poder identificarlas singularmente de un modo completo. Por lo demás, la energía de intercambio desempeña igualmente una función importante en las acciones recíprocas existentes entre las partículas que integran el núcleo atómico.

[40] Véase la Sección 13.

39. *Energía interna de los núcleos*

Los núcleos atómicos son partículas compuestas, integradas por protones positivos y neutrones, salvo en el caso del núcleo de hidrógeno ordinario.[41] La masa del protón equivale a 1836 veces la masa del electrón y la masa del neutrón es sensiblemente igual, [42] por lo cual, la masa del átomo se encuentra concentrada prácticamente en el núcleo. Entonces, el núcleo atómico está constituido fundamentalmente por dos tipos de partículas pesadas o bariones, a las que se les ha dado el nombre genérico de nucleones. Los protones nucleares tienen una carga positiva cuya magnitud es exactamente igual a la del electrón atómico, pero de signo contrario; mientras que los neutrones no tienen ninguna carga eléctrica. Debido a eso, la carga del núcleo siempre es positiva y su magnitud es igual al número de protones que lo forman y, también, igual al número de electrones negativos que giran alrededor del núcleo, cuando el átomo no se encuentra ionizado. Ahora bien, los neutrones y protones que constituyen un núcleo atómico se encuentran unidos en la forma más poderosa que se conoce y, para muchísimos efectos, se comportan como si el núcleo fuese una sola partícula compacta. Esta constitución nuclear planteó el problema de saber cómo pueden unirse entre sí partículas cuya carga eléctrica es del mismo signo y, por otra parte, partículas eléctricamente neutras. La explicación encontrada radica en el llamado *defecto de masa* de los núcleos atómicos. El protón tiene un peso atómico de 1.00813 unidades y el neutrón de 1.00895 unidades. Naturalmente, el núcleo del átomo de hidrógeno ordinario, formado por un solo protón, tiene exactamente el mismo peso atómico del protón y, por ende, es el único núcleo

[41] En los otros dos isótopos del hidrógeno, el deuterio y el tritio, su núcleo está formado por un protón y un neutrón, y por un protón y dos neutrones, respectivamente; y el núcleo del átomo de helio está constituido por dos protones y dos neutrones.

[42] En rigor, es de 1838.6 veces la masa del electrón.

en el cual no existe el defecto de masa. Pero, en cambio, el núcleo del átomo de deuterio o hidrógeno pesado, formado por un protón y un neutrón, tiene un peso atómico de 2.01472 unidades. Dicho peso es inferior en 0.00236 unidades a la suma aritmética de las masas del protón y del neutrón, que es de 2.01708 unidades. Tal diferencia es el defecto de masa del núcleo del deuterio. Por su parte, el núcleo del átomo de litio, que consta de tres neutrones y tres protones, tiene un peso atómico de 6.01692 unidades; en tanto que la suma aritmética de los pesos de sus nucleones integrantes es: $3 \times 1.00895 + 3 \times 1.00813 = 6.05124$ unidades. Por consiguiente, el defecto de masa del núcleo de litio asciende a 0.03432 unidades. Este incremento en el defecto de masa se va haciendo mayor, a medida que se trata de núcleos de átomos más pesados, hasta llegar a ser de 0.238 unidades para el núcleo de uranio.[43]

Pues bien, como se ha comprobado experimentalmente en los procesos de fusión atómica, lo que ocurre es que al formarse el núcleo de un átomo, una parte de la masa de los nucleones se convierte en energía. La magnitud de la masa transformada corresponde precisamente al defecto de masa y la energía resultante de esa conversión es liberada hacia el exterior del núcleo. En consecuencia, la cohesión de los protones y los neutrones en el núcleo se debe a la energía faltante que ha sido despedida fuera del propio núcleo. Y, por lo tanto, como se ha podido verificar también en los experimentos, para conseguir que un núcleo se desintegre —ya sea por radiactividad natural o provocándola artificialmente— es indispensable suministrarle la cantidad de energía que se puso en libertad al formarse el mismo núcleo, para que se realice su conversión inversa en masa y, así, los nucleones recuperen la masa que habían cedido y puedan separarse. Por supuesto, estas transformaciones recíprocas de masa y energía se efectúan de acuerdo con la ecuación de Einstein, de la que ya hemos hablado. Entonces, en el caso de la cohesión

[43] M. von Laue, "Inertia and energy", en *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, Evanston, Ill., Library of Living Philosophers, 1949, pp. 503-533.

nuclear, nos encontramos ante el hecho sorprendente de que su causa consiste justamente en la carencia de una cierta cantidad de masa, convertida en energía y puesta en esa forma en libertad. En todo caso, la energía de la cohesión nuclear y de las interacciones fuertes entre las particulas elementales, es la forma más poderosa de energía que existe. Por su orden de magnitud, dicha energía equivale a 100 veces la energía electromagnética, a 10^5 veces[44] la energía de las interacciones débiles de las particulas elementales, y a 10^{39} veces[45] la energía gravitacional. Sólo que esta energía de las interacciones fuertes se ejerce únicamente a distancias sumamente pequeñas; su alcance es del orden de 10^{-13} centímetros[46], que corresponde al del cuanto de longitud.[47] Esa distancia es la indispensable para que se supere la repulsión de los protones, debida a sus cargas eléctricas de igual signo, con la consiguiente manifestación de la atracción producida por la energía de cohesión nuclear. La formulación de una explicación conjunta para esas cuatro energías fundamentales, constituiría una teoría única para la física entera.[48]

40. *Significación de la energía*

Resumiendo el examen que hemos hecho, tenemos que la energía y la masa son los aspectos primordiales del movimiento, o sea, las formas fundamentales de la existencia

[44] Es decir, 100 000 veces.

[45] Esto es, 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 veces.

[46] O sea, 0.0000000000002 cm.

[47] Véase la Sección 15.

[48] Como es sabido, Einstein, W. Mayer, T. Kaluza, O. Klein, H. Weyl, O. Veblen, B. Hoffman y otros investigadores trabajaron bastante para establecer una teoría del campo unificado para la gravitación y el electromagnetismo, pero sin conseguirlo. En años recientes se ha logrado unificar la explicación de las interacciones débiles y de las electromagnéticas; y, según parece, también se conseguirá incluir en esa explicación a la energía nuclear. Por otra parte, se está desarrollando ahora la teoría de la supergravedad, como una extensión de la relatividad generalizada, con la cual se intenta lograr una explicación unificada de las cuatro energías fundamentales.

objetiva de los procesos en movimiento. Pero la masa y la energía no son aspectos que tengan existencia autónoma sino que, por lo contrario, son inseparables entre sí y, a la vez, son inherentes a la existencia material de la cual constituyen una manifestación. La masa es el aspecto pasivo y la energía es el aspecto activo de la materia, que se mueve incesantemente y se transforma de continuo como resultado de la oposición que se ejerce entre la energía y la masa, puestas de manifiesto en las formas de acción y reacción, de atracción y repulsión, de impulso y resistencia, de cohesión y desintegración. Además, la energía posee muchas formas que producen efectos diferentes —desplazamiento, rotación, calor, electromagnetismo estático y dinámico, luz, radiaciones invisibles, desintegración de partículas elementales, cohesión química, reacciones químicas, fusión y desintegración nucleares— y cada una de estas formas de energía es susceptible de transformarse en todas las otras, en cantidades equivalentes. Por otro lado, la energía es capaz igualmente de convertirse en masa, lo mismo que la masa en energía. Así, la suma de todas las cantidades de masa y de todas las cantidades de energía es constante. Y, por lo tanto, también es constante la suma de las acciones y reacciones, de las atracciones y repulsiones, los impulsos y resistencias, las emisiones y absorciones, y las cohesiones y desintegraciones.

Por otra parte, la categoría de energía forma parte integrante de todos los dominios de la física. En este sentido, el lazo de unión entre todos esos dominios es el principio de la conservación y la transformación de la energía. En efecto, dicho principio, expresado como primera ley de la termodinámica, es el punto de partida de la teoría del calor y, a la vez, representa su vínculo inseparable con la mecánica. De otro lado, los procesos eléctricos y magnéticos o electrodinámicos se encuentran enlazados por medio de varios eslabones con los procesos mecánicos, siendo el primero y más importante de ellos el principio de la conservación de la energía. En la teoría de la relatividad,

también tiene cumplimiento irrestricto el principio de la conservación y la transformación de la energía y la masa; y lo mismo sucede en los niveles microcósmicos de la existencia, como se ha comprobado definitivamente. A su vez, tanto la física relativista como la mecánica cuántica están unidas entre sí y se conectan firmemente con la electrodinámica y la mecánica clásicas, justamente a través del cumplimiento universal que en todos esos campos tiene el principio de la conservación y la transformación de la energía y la masa. A más de esto, en todas las aplicaciones técnicas que el hombre hace de sus conocimientos físicos, desde el arco y la palanca hasta las pilas atómicas y las naves espaciales, figura siempre en primer lugar la energía. A tal punto sucede así que todo mecanismo y, en general, cualquier proceso tecnológico es juzgado de acuerdo con su balance de energía, o sea, por la proporción en que la energía suministrada es transformada en la forma de energía deseada. Por ello, sin hacer exageración alguna, la categoría de energía es considerada como la concepción primordial de la física. Y, con esto, expresamos simplemente la correspondiente importancia fundamental que la energía tiene en la existencia objetiva de la naturaleza y de la sociedad.

V

LA CATEGORÍA DE MOVIMIENTO

41. *Noción del movimiento*

La existencia objetiva del universo se manifiesta como existencia de la materia en movimiento. El movimiento es un resultado de la acción recíproca existente entre todas y cada una de las partes del universo, es decir, que se trata de una propiedad intrínseca, inmanente e inseparable de los procesos existentes. En su significación más general, el movimiento comprende todas las variaciones y transformaciones que ocurren en el universo, desde las simples translaciones y rotaciones espaciales hasta los cambios y mutaciones más complejos, incluyendo el pensamiento humano. Por lo tanto, como forma fundamental de la existencia, el movimiento participa del carácter objetivo y universal de la materia. Más aún, la materia y el movimiento son de tal manera inseparables que no existe materia inmóvil, ni tampoco existe movimiento inmaterial. El movimiento se manifiesta siempre a través de las formas concretas en que varían y se transforman los procesos de la naturaleza, de la sociedad y del pensamiento. Por consiguiente, cada movimiento concreto se muestra en condiciones particulares, determinadas cualitativa y cuantitativamente por las propiedades específicas del proceso y por sus relaciones activas con los otros procesos. De esta manera, el movimiento pone al descubierto su particularidad en cada uno de los procesos existentes y en el curso de su desarrollo. Ahora bien, al examinar las distintas formas de movimiento es como se llegan a descubrir las propiedades que dichas formas tienen en común y las diferencias específicas existentes entre ellas. Así, la relación entre la universalidad del movimiento y la particularidad de sus manifestaciones concretas, representa la conexión entre el carácter común —con-

tenido en los caracteres particulares de todos los movimientos— y el carácter relativo, condicional y transitorio de cada uno de los movimientos concretos y singulares. Por otra parte, un mismo proceso se mueve siempre de varias maneras a la vez y cada forma de movimiento, aun la que pueda ser considerada como la más simple, está constituida por la composición de otros movimientos; de tal manera que no es posible tener como primaria a una forma determinada de movimiento, sino únicamente dentro de restricciones definidas y con carácter relativo. Además, un movimiento cualquiera siempre es capaz de transformarse en otro movimiento de la misma especie o en otras formas de movimiento. En consecuencia, cada proceso existente, lo mismo que el conjunto universal de todos los procesos, exhibe simultáneamente una multitud de movimientos y de conversiones recíprocas de unos movimientos en otros. Por todo esto es que la categoría de movimiento, formulada como síntesis de los conocimientos logrados en la investigación científica, permite destacar y explicar muchas de las propiedades que muestran los procesos existentes en su actividad.

El movimiento de los cuerpos ha sido siempre un concepto fundamental de la ciencia física. En su forma más sencilla, como relación de cambio entre el espacio y el tiempo, el movimiento constituye la base del estudio de la cinemática. Para representar e investigar científicamente los movimientos más sencillos, se estableció en la física clásica el concepto abstracto de partícula material.[1] El cambio de posición de una partícula material constituye un desplazamiento, que puede ser una translación o una rotación o, bien, la conjugación de una translación con una rotación. El ritmo en que se efectúa el cambio de posición espacial, respecto al tiempo, constituye la velocidad con que se mueve la partícula material; dicha velocidad será linear en el caso de una translación, y angular en el de una rotación. La relación en que varía su velocidad con el tiempo, es la aceleración que experi-

[1] Véase la Sección 29.

menta la partícula material en su movimiento; y, como sucede con la velocidad, la aceleración será linear para las translaciones y angular para las rotaciones. Además, la aceleración puede efectuarse en el sentido de incrementar la velocidad o, bien, en el sentido de su retardamiento. Pues bien, utilizando estos conceptos es posible representar todos los movimientos mecánicos de una partícula material, lo mismo que las transformaciones de unos movimientos en otros. Por otra parte, los cuerpos de dimensiones mesocósmicas pueden ser considerados como sistemas de partículas materiales, ya sea que se trate de cuerpos rígidos o de flúidos; y, por lo tanto, resulta igualmente posible estudiar de esta manera sus movimientos y sus cambios de movimiento. Dentro de estas condiciones se desarrolló la cinemática, o sea, la ciencia que estudia abstractamente el movimiento en su aspecto más simple y unilateral, considerándolo como un mero cambio espacio-temporal; pero sin tomar en cuenta las causas que lo producen o lo modifican, ni tampoco los efectos que provoca. Por lo tanto, la cinemática es también el estudio de las variaciones temporales que resultan, desde el punto de vista de la geometría métrica,[2] considerando inalterables las propiedades del espacio.

Pero, en realidad, el movimiento se encuentra ligado de un modo inseparable a las otras propiedades de los procesos y, desde luego, a su mutua interacción. En rigor, todo movimiento es producido por ciertas causas y, a su vez, es causante de ciertos efectos. O sea, dicho de otro modo, que el movimiento se produce por la acción de alguna fuerza, o por la conjugación de varias fuerzas, y tiene como consecuencia la realización de determinados cambios debidos a la reacción que surge ineludiblemente. La consideración de las fuerzas que producen el movimiento o que se oponen a su realización, constituye el

[2] Como se sabe, la geometría métrica estudia las propiedades espaciales dentro del dominio de transformaciones ante las cuales se mantienen invariantes las longitudes. Por ello, en términos generales, la geometría métrica coincide con la geometría elemental.

dominio de estudio de la dinámica. Dentro de esta otra rama de la física, el concepto de partícula material se enriquece con la propiedad de tener una masa inercial que se opone a las fuerzas que tratan de impulsarla al movimiento o, más precisamente, que tienden a producir un cambio en su estado de movimiento. Entonces resulta que en todo movimiento existen dos tendencias opuestas: la acción o impulso, y la reacción o resistencia. El impulso o acción se denomina fuerza, que es la manifestación elemental de la energía; y la resistencia o reacción es lo que se llama masa. En consecuencia, el movimiento consiste justamente en el conflicto entre la acción y la reacción; ya que hasta el reposo relativo se produce por el equilibrio transitorio entre la acción y la reacción. Con estos elementos conceptuales se desarrolló la dinámica de las partículas materiales y de los sistemas de partículas materiales, considerando el movimiento mecánico en un aspecto más complejo y menos unilateral que el de la cinemática. En consecuencia, la dinámica representa el estudio de los cambios espacio-temporales que se producen mediante las acciones y reacciones de las fuerzas y las masas, pero sin que se alteren la propiedades del espacio y el tiempo, ni tampoco cambien las cualidades de los procesos en movimiento.

42. *Leyes clásicas del movimiento*

En la física clásica, la determinación precisa del movimiento se expresa mediante las tres leyes de Newton y la ley de la gravitación universal, también newtoniana. La primera ley del movimiento, también conocida con el nombre de principio de inercia de Galileo, establece que cuando un cuerpo no se encuentra sujeto a fuerzas que actúen sobre él —es decir, cuando está abandonado a su propio movimiento—, entonces se desplaza libremente con una velocidad uniforme y describiendo una trayectoria rectilínea. Naturalmente, en la mayoría de los casos concretos que podemos observar, advertimos que los cuerpos

tienden a dejar de moverse en cuanto cesa la acción de la fuerza que produjo su movimiento; pero esto se explica por el hecho de que dichos cuerpos se encuentran sujetos a fuerzas de fricción con otros cuerpos, lo mismo que a la resistencia del medio en que se mueven. La segunda ley del movimiento se refiere a la variación de la velocidad de los cuerpos —esto es, a su aceleración—, expresando la relación existente entre la fuerza aplicada, la masa del cuerpo y la aceleración que se produce. Por lo tanto, la segunda ley del movimiento constituye una definición de la fuerza F y de la masa m, en función de la aceleración a, de tal modo que con ella se expresa la relación: $F = ma$; o bien: $m = \frac{F}{a}$. Así, la aceleración que se produce en un cuerpo determinado por una fuerza también determinada, es siempre de la misma magnitud, independientemente de que entre los diferentes instantes en que se aplique dicha fuerza hayan podido cambiar la velocidad del cuerpo, su posición, su temperatura o cualquiera otra de sus propiedades. Igualmente, cuando una misma fuerza se aplica a cuerpos con masas diferentes, las aceleraciones que produce se encuentran siempre en la misma proporción que guardan sus masas respectivas. La tercera ley del movimiento establece que la acción ejercida sobre un cuerpo es siempre igual a la reacción que dicho cuerpo ejerce; o sea, dicho de otra manera, que si un cuerpo cualquiera A ejerce cierta fuerza F_a sobre otro cuerpo cualquiera B, entonces también el cuerpo B ejerce sobre el cuerpo A una fuerza $-F_a$, de igual magnitud pero de sentido opuesto. De esta manera se advierte cómo es posible aplicar fuerzas iguales a cuerpos de masas diferentes. Por lo demás, es claro que cuando se aplican simultáneamente dos o más fuerzas a un mismo cuerpo, entonces la acción resultante es igual a la suma vectorial de esas fuerzas, es decir, a la fuerza componente constituida por la conjugación de ellas, tomando en cuenta su magnitud, su dirección y su sentido.

La ley de la gravitación universal expresa el hecho de que entre todos los cuerpos se ejerce siempre una fuerza de atracción, la cual es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Si representamos por m_1 y m_2 las respectivas masas de dos cuerpos cualesquiera, por r su distancia y por γ la constante universal que indica la proporcionalidad de la gravitación, entonces dicha ley queda expresada matemáticamente de la siguiente manera:

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Esta ley de la gravitación universal explica las leyes de Kepler sobre el movimiento planetario, según las cuales cada planeta describe una elipse en la cual uno de sus focos está ocupado por el Sol (primera ley), con velocidades variables determinadas por la regla de la igualdad de las áreas barridas por el radio vector (segunda ley) y cuyas dimensiones están dadas por la proporcionalidad entre los cuadrados de los periodos y los cubos de los semiejes mayores de la propia elipse descrita por el planeta (tercera ley). Por cierto, es interesante destacar que en el movimiento planetario se pone claramente de manifiesto la interpenetración entre los dos aspectos contradictorios del movimiento, ya que se tiene simultáneamente un movimiento en equilibrio entre cada planeta y el Sol, y un equilibrio entre las fuerzas actuantes que producen dicho movimiento.

Análogamente a la gravitación universal, entre las cargas eléctricas también se ejerce siempre una fuerza que es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Si q_1 y q_2 son las respectivas cargas, r la distancia entre ellas y a la constante de proporcionalidad, entonces dicha ley, debida a Coulomb, queda expresada matemáticamente así:

$$F = a \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

Como se advierte fácilmente, la fuerza producida por las

cargas eléctricas es análoga a la fuerza de gravitación producida por las masas; pero con la diferencia de que, mientras la fuerza de gravitación siempre es atrayente, en cambio la fuerza producida por las cargas eléctricas puede ser atrayente o repelente. Como existen dos clases opuestas de cargas eléctricas, unas negativas y las otras positivas, resulta que las cargas de la misma clase producen una fuerza repelente, en tanto que las cargas de signos opuestos engendran una fuerza atrayente. En el caso de la interacción de dos polos magnéticos se cumple una ley similar, de tal modo que cuando los dos polos son del mismo signo la fuerza es repelente, y cuando se trata de polos de signos contrarios, entonces la fuerza es atrayente. La magnitud de esta fuerza magnética de atracción o de repulsión es también directamente proporcional al producto de la intensidad magnética de los polos e inversamente proporcional a su distancia. Sin embargo, el magnetismo difiere de la electricidad por el hecho de que jamás podemos separar los polos de un imán en forma absoluta, en tanto que sí podemos hacer tal cosa con las cargas eléctricas de signos opuestos. Pues bien, las fuerzas que hemos descrito hasta aquí, constituyen los tipos fundamentales de fuerzas que se consideran en la física clásica, para explicar los distintos movimientos de los cuerpos y los cambios que se producen en sus estados de movimiento.

43. *Universalidad y relatividad del movimiento*

El movimiento de todo lo existente es universal, de tal manera que cada uno de los cuerpos o procesos y el universo en su conjunto se encuentran en movimiento. Sin embargo, para poder determinar el movimiento de un cuerpo en particular, es indispensable referirlo a algún otro cuerpo; y únicamente en relación con ese otro cuerpo es que resulta posible poner de manifiesto la forma de ese movimiento particular y sus características específicas. Así, por ejemplo, el movimiento de un tren se establece con respecto a cuerpos fijos en la superficie terrestre, en

tanto que la translación de nuestro planeta se determina mediante las llamadas estrellas fijas. Esta relatividad del movimiento se debe justamente al hecho de que no existe ningún cuerpo en reposo absoluto, sino que todos se encuentran siempre en movimiento. Además, cada cuerpo o proceso está vinculado indisolublemente a los otros cuerpos y procesos existentes, a través de una multitud de formas de interacción universal. Y son precisamente estos vínculos materiales activos los que definen la coordinación de los cambios espacio-temporales de cada cuerpo en particular y de los procesos que en él se desarrollan. Por lo tanto, para poder determinar un movimiento específico cualquiera, es indispensable considerar siempre a otro cuerpo que sirva como *punto de referencia.* En esas condiciones, la coordinación de los cambios espacio-temporales que se producen con respecto a dicho cuerpo, constituye un *sistema de referencia.* Ahora bien, haciendo abstracción del contenido material de las relaciones de espacio y tiempo, se puede establecer la coordinación de los cambios que ocurren, utilizando un sistema de referencia en el cual se puedan atribuir a cada proceso tres coordenadas espaciales y una coordenada temporal. En realidad, dicho sistema de referencia se apoyará siempre en un cuerpo escogido especialmente para desempeñar esa función. Por ejemplo, se pueden tomar como coordenadas espaciales las distancias existentes entre cada punto que se considere y tres planos perpendiculares entre sí, como lo son generalmente el piso y dos de las paredes de un salón; o, también, se puede tomar el ángulo que forma el plano vertical de un lugar con el plano del ecuador terrestre y el ángulo formado por el plano meridiano del propio lugar con el meridiano considerado como origen, tal como se hace para definir la latitud y la longitud geográficas. De una manera simplificada, lo que se acostumbra es establecer un sistema de referencia y luego definir con respecto a él las tres coordenadas espaciales, x, y, z, lo mismo que la coordenada temporal única t. Como es sabido, en la física clásica se puede considerar como sistema

de referencia a cualquier sistema inercial,[3] de tal manera que todo cuerpo que no esté sometido a la acción de una fuerza se encontrará en reposo o estará animado de un movimiento rectilíneo y uniforme con respecto a dicho sistema. Más aún, el propio sistema inercial puede encontrarse en movimiento, con tal que no esté sujeto a ninguna aceleración ni se trate tampoco de un movimiento rotatorio, porque éste implica necesariamente una aceleración hacia el centro de giro.

Los sistemas de referencia pueden ser sometidos a diversas transformaciones, sin que por eso varíen las leyes newtonianas del movimiento. En primer lugar, un sistema de referencia puede ser transladado de un sitio a otro, sin que se afecten dichas leyes y, por consiguiente, sin que se modifiquen las propiedades dinámicas de los cuerpos.[4] Esto nos indica, por lo tanto, que las leyes del movimiento permanecen invariantes ante una translación espacial y, además, que el espacio tiene la propiedad de ser homogéneo en todos los lugares. En consecuencia, es posible escoger como origen del sistema de referencia a un cuerpo situado en cualquier lugar, dado que las leyes del movimiento tienen la misma forma en todos los lugares. También es posible someter el sistema de referencia a una rotación, tomando como centro de giro el punto que sirve como origen del sistema. En este caso, el sistema deja de ser inercial mientras se realiza el movimiento de rotación —debido a la aceleración centrípeta que se produce—, pero vuelve a serlo en cuanto cesa el movimiento y queda consumada la rotación. Por consiguiente, las leyes del movimiento son invariantes ante una rotación del sistema de referencia y, a la vez, resulta que el espacio tiene la propiedad de ser isotrópico, puesto que los procesos físicos no se alteran sea cual fuere la dirección en que se les

[3] Esto es, un sistema en el cual se cumple la ley de la inercia.

[4] Por ejemplo, si el origen se translada a una distancia a a lo largo del eje de las x, entonces la relación entre las nuevas coordenadas (x', y', z', t') y las primitivas (x, y, z, t), es la siguiente: $x' = x + a$; $y' = y$; $z' = z$; $t' = t$.

considere.[5] Entonces, como todos los cambios de posición en el espacio son translaciones o rotaciones o, bien, combinaciones de ambas, tenemos que la homogeneidad y la isotropía del espacio nos permiten escoger como sistema de referencia a cualquier sistema inercial, sin ninguna restricción. Por lo tanto, en cada caso concreto, la selección del sistema de referencia dependerá de lo que resulte más conveniente de acuerdo con las condiciones del problema que se tenga planteado.

Por otra parte, las leyes del movimiento son igualmente invariantes ante una reflexión en el espacio, o sea, ante el cambio de un sistema de coordenadas orientado hacia la derecha, por un sistema de referencia orientado hacia la izquierda.[6] Por ende, las propiedades físicas de los procesos se mantienen invariantes, independientemente de que se considere como referencia un sistema derecho o uno izquierdo, debido a que el espacio es simétrico.[7] De otro lado, las leyes del movimiento son invariantes ante una translación temporal, es decir, ante el cambio del instante considerado como origen del sistema de referencia, por otro instante posterior o anterior.[8] Esto significa que el tiempo es homogéneo y, por consiguiente, que podemos tomar como origen a cualquier instante de su

[5] En tal caso, las leyes del movimiento permanecen invariantes debido a que su expresión matemática es una ecuación vectorial y, como es sabido, una ecuación de este tipo no cambia de forma cuando se hace girar el sistema de coordenadas.

[6] Por ejemplo, un sistema de referencia derecho está definido por los dedos pulgar, índice y medio de nuestra mano derecha, colocados de manera que sean perpendiculares entre sí; en tanto que un sistema de referencia izquierdo queda definido por los mismos dedos de nuestra mano izquierda colocados en posición análoga. La transformación de un sistema derecho (x, y, z, t) en un sistema izquierdo (x', y', z', t'), queda expresada por las siguientes relaciones entre sus coordenadas: $x' = x;\ y' = y;\ z' = -z;\ t' = t$.

[7] La simetría espacial era considerada como una propiedad que tenía un cumplimiento irrestricto en todos los procesos físicos, hasta que el descubrimiento hecho por Lee y Yang demostró que el principio de conservación de la paridad no se cumple en algunos casos de interacción entre partículas elementales. Véase la Sección 14.

[8] Si b es la diferencia entre los instantes tomados respectivamente como origen del tiempo en los dos sistemas de referencia, entonces las relaciones entre las coordenadas del sistema transformado (x', y', z', t') y las del sistema inicial (x, y, z, t), serán: $x' = x;\ y' = y;\ z' = z;\ t' = t + b$.

transcurso. Además, suponiendo abstractamente que fuera posible invertir el sentido en que fluye el tiempo,[9] es decir, que se pudiera realizar la reflexión temporal, entonces se podría tener una representación inversa de cada proceso físico, sin que se alteraran por ello las leyes del movimiento. Así, se podría invertir el sentido de la coordenada temporal en cualquier sistema de referencia, dado que el tiempo tiene la propiedad de ser simétrico.[10] Por lo demás, aun cuando el tiempo no se puede invertir realmente, lo que sí sucede es que la mayoría de los procesos físicos son reversibles y, por ello, pueden ocurrir tanto en una cierta sucesión de estados como en la secuencia opuesta. Entonces, la simetría temporal se aplica en realidad al hecho de que, en los procesos mutuamente reversibles, permanecen invariantes las leyes del movimiento y las propiedades dinámicas de los propios procesos.

Además de las transformaciones antes mencionadas, también es posible cambiar de un sistema de referencia a otro que se esté moviendo con una velocidad uniforme respecto al primero o, lo que es lo mismo, que no se encuentre sometido a una aceleración. Las leyes del movimiento son invariantes ante dicho cambio en el sistema de referencia, conocido con el nombre de transformación de Galileo, puesto que todo sistema sujeto a un movimiento uniforme de translación con respecto a un sistema inercial, también es un sistema inercial.[11] Ahora bien, las seis invariancias que acabamos de relatar —tres espaciales, dos temporales y una de la translación uniforme— tienen cumplimiento para todos los movimientos considerados dentro de la

[9] Véanse a este respecto las Secciones 21, 22 y 23.

[10] Esta invariancia de los procesos físicos ante la inversión del tiempo también ha sido puesta en entredicho por la falla en la conservación de la paridad. En todo caso, las relaciones entre las coordenadas del sistema inicial (x, y, z, t) y las coordenadas del sistema transformado (x', y', z', t'), serían: $x' = x;\ y' = y;\ z' = z;\ t' = -t$.

[11] Suponiendo que el movimiento relativo entre ambos sistemas se efectúe en la dirección del eje de las x, con la velocidad v, entonces las relaciones entre las coordenadas del primer sistema (x, y, z, t) y las coordenadas del nuevo sistema de referencia(x', y', z', t'), serían las siguientes: $x' = x - vt;\ y' = y;\ z' = z;\ t' = t$.

mecánica clásica. Para poder generalizarlas a todos los movimientos físicos, fue indispensable tomar en cuenta las ecuaciones que expresan el movimiento de los procesos electromagnéticos, entre los cuales está incluida la propagación de las ondas luminosas, lo mismo que la ley de la constancia de la velocidad de la luz y el hecho de que dicha velocidad constituye el límite máximo de la rapidez con que se puede transmitir la energía. Entonces se tuvo que considerar la ecuación de propagación de una onda esférica,[12] la cual no es invariante ante una transformación galileana; de tal manera que el cambio de un sistema de referencia a otro sí modifica esta ecuación de movimiento. En consecuencia, fue necesario recurrir a otro tipo de transformación, en la cual se conservara esa invariancia. Esa nueva transformación quedó expresada en las ecuaciones de Lorentz,[13] conforme a las cuales la ecuación de propagación de la onda esférica conserva su misma forma.[14] Al propio tiempo, se ha podido demostrar que toda transformación que permita pasar de las coordenadas (x, y, z, t) a las coordenadas (x', y', z', t'), conservando la forma de la ecuación antes expresada, resulta ser una combinación de la transformación de Lorentz con una translación, una rotación y una reflexión en el espacio, lo mismo que con una translación y una reflexión en el tiempo.

[12] Esto es: $x^2 + y^2 + z^2 = c^2t^2$.

[13] En su forma simple las relaciones de transformación entre las coordenadas del sistema inicial (x, y, z, t) y las coordenadas del nuevo sistema de referencia (x', y', z', t') son las siguientes:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad y' = y, \qquad z' = z, \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

[14] Efectivamente, sustituyendo las coordenadas respectivas indicadas en la nota 13, de la ecuación: $x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2t'^2$, se obtiene:

$$\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)\left(x^2 + y^2 + z^2\right) = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)c^2t^2;$$

y, finalmente: $x^2 + y^2 + z^2 = c^2t^2$

Por consiguiente, tenemos que la expresión relativista de la vinculación entre los cambios espaciales y temporales representa la conservación de la homogeneidad, la isotropía y la simetría del espacio, al par que de la homogeneidad y la simetría del tiempo. Lo único que se pierde es la invariancia ante la transformación galileana, pero sólo para quedar sustituida por la correspondiente invariancia ante la transformación lorentziana. Por otra parte, es fácil advertir que las ecuaciones de Lorentz cumplen con el requisito de correspondencia, de tal manera que en las condiciones limitadas del dominio de la física clásica, se convierten en las ecuaciones de Galileo. En efecto, cuando los procesos se mueven a una velocidad v que sea muy pequeña en comparación con la velocidad de la luz c, como ocurre en los procesos mesocósmicos, entonces las transformaciones de Lorentz se convierten en transformaciones galileanas.[15] Por otro lado, tenemos que cuando se pasa de un sistema inercial a otro, mediante una transformación lorentziana, se mantiene invariante el vínculo indisoluble entre el espacio y el tiempo y, por ende, permanece constante la ley de la propagación de la luz. A la vez, dentro de este nexo ineludible del espacio-tiempo, se destaca con claridad el hecho de que dos procesos que sean simultáneos respecto a un sistema de referencia determi-

[15] Cuando v es muy pequeña en comparación con c, los cocientes de $\frac{v}{c^2}$ y de $\frac{v^2}{c^2}$ son muchísimo más pequeños todavía y, por consiguiente, se puede despreciar su valor sin que se afecte por ello la aproximación del cálculo. Así tenemos que:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \fallingdotseq \frac{x - vt}{\sqrt{1 - 0}} = \frac{x - vt}{\sqrt{1}} = \frac{x - vt}{1} = x - vt;$$

y análogamente;

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \fallingdotseq \frac{t - 0}{\sqrt{1 - 0}} = \frac{t}{\sqrt{1}} = \frac{t}{1} = t.$$

nado, pueden dejar de serlo para otro sistema de referencia distinto. Al lado de esta relatividad de la simultaneidad, se tiene también la relatividad de las distancias espaciales entre dos procesos y la ley relativista para la suma de las velocidades, con la exigencia de que su resultado sea cuando mucho igual a la velocidad de la luz y nunca mayor que ésta, independientemente de la magnitud que puedan tener las velocidades sumadas. Y, por lo tanto, de las propiedades objetivas expresadas en la ecuación de propagación de la onda esférica, se desprenden como consecuencias las características fundamentales de la cinemática relativista.

44. *Caracterización de la masa*

La masa es una propiedad fundamental de la materia, como lo demuestra el hecho de que todos y cada uno de los procesos existentes tienen siempre una cierta masa. Pero no por ello se debe confundir el concepto de masa con el concepto de materia, ya que este último tiene una extensión mucho mayor. En todo caso, la masa es solamente una de las múltiples propiedades de la materia, o sea, de la existencia objetiva. Por consiguiente, la energía, el espacio, el tiempo, el movimiento y las otras propiedades de los procesos existentes son tan materiales como la masa, y todas ellas son igualmente susceptibles de ser comprobadas en cada caso concreto por medio de experimentos. Además, la masa es una propiedad conocida de una manera tan precisa, que es posible medir su magnitud para cada proceso en particular y representarla mediante una cantidad, ya sea que se trate de alguno de los procesos que tenemos a nuestro alcance en la vida cotidiana, de una enorme estrella o de un diminuto electrón. La noción elemental de la masa quedó establecida por la manifestación de la resistencia o reacción que opone cualquier proceso a un cambio en su estado de movimiento, incluyendo el caso particular del reposo, cuando recibe la acción o el impulso de una fuerza. Por lo tanto, ya en su

manifestación elemental, la masa se muestra ligada inseparablemente a la fuerza. Al mismo tiempo que son inseparables, la masa y la fuerza se pueden intercambiar y transformarse una en la otra. Por ejemplo, una viga que se encuentra apoyada sobre una columna ejerce sobre ésta una presión debida a su masa y, en consecuencia, la masa de la viga se muestra entonces como una fuerza. A la vez, en ese mismo caso, la columna ejerce sobre la viga una fuerza, igual y opuesta a la que recibe, que impide el movimiento y mantiene la estabilidad del sistema formado por la viga y la columna, de manera que la fuerza se manifiesta entonces como masa resistente. Para medir la masa de un proceso, se la puede comparar con la masa de otro proceso o, bien, se puede establecer valiéndose de la relación inversa entre la masa y la aceleración de dicho proceso, con la masa y la aceleración de otro proceso con el cual se encuentre en interacción. En el primer caso se obtiene el valor de la masa gravitacional y, en el segundo caso, la magnitud de la masa inercial; con la circunstancia de que dichos valores son siempre idénticos para un mismo proceso. A más de esto, la masa es invariante ante todas las transformaciones posibles que se estudian en la física clásica, a las cuales nos hemos referido en la Sección anterior, lo mismo que ante todas las reacciones químicas. La persistencia y la invariancia de esta propiedad universal de los procesos existentes, han sido comprobadas experimentalmente de manera incontrovertible y se encuentran expresadas en el principio de la conservación de la masa.

Por otra parte, toda partícula cargada eléctricamente tiene también una masa cuya magnitud se determina mediante la carga eléctrica o cantidad de electricidad, las dimensiones de la partícula y la velocidad de la luz.[16] Al propio tiempo, de acuerdo con la ley de la auto-inductancia, cuando una partícula cargada eléctricamente es sometida a un desplazamiento, muestra cierta renuencia

[16] La ecuación correspondiente es: $m = \frac{e^2}{ac^2}$, en donde m es la masa, e la carga eléctrica, a el radio de la partícula y c la velocidad de la luz.

al intento de acelerarla y, por lo tanto, presenta resistencia al aumento de la intensidad del campo eléctrico correspondiente. En consecuencia, el movimiento de dicho campo eléctrico produce el surgimiento de un campo magnético y, entonces, la coexistencia de ambos campos implica un flujo de energía y una inercia adicional. De este modo se pone de manifiesto la existencia de la inercia de la energía electromagnética o radiación, que representa una masa inercial adicional en la partícula. En el caso de que se trate de un proceso de dimensiones comparables a las humanas o mayores, y teniendo en cuenta la magnitud de las cargas eléctricas que son manejadas efectivamente en los experimentos o en las experiencias comunes, la masa inercial correspondiente a la energía electromagnética resulta ser de una magnitud ínfima y, por ende, de un valor despreciable en comparación con la masa inercial poseída originalmente por el proceso. Pero, en cambio, cuando se trata de las partículas elementales, dicha masa adicional debida a la inercia de la energía resulta ser del mismo orden de magnitud que su masa inercial en reposo. Posteriormente, la teoría de la relatividad condujo al descubrimiento de que todas las formas de energía, y no sólo la energía radiante, poseen inercia y, por consiguiente, añaden una masa inercial a la que ya tienen las partículas.[17] Esta generalización de la inercia de la energía trajo como consecuencia el reconocimiento de la relación indisoluble que existe entre la masa y la energía, lo mismo que entre el principio de conservación de la masa y el principio de conservación de la energía.

Más adelante, los resultados de varios experimentos y las exigencias planteadas por el desarrollo de la teoría de la relatividad, llevaron conjuntamente al descubrimiento de que la masa de un proceso depende de su estado de movimiento, tal como ocurre con su energía y con sus propiedades espaciales y temporales. Esto significa que la cantidad de movimiento de un proceso aumenta mucho más rápidamente que su velocidad y, como la cantidad de

[17] A. Einstein, *Ann. der Physik, 18,* 1905, p. 639.

movimiento se mide por el producto de la masa por la velocidad, resulta que la masa aumenta con la velocidad, en vez de ser invariante ante el movimiento. Naturalmente, para que este incremento de la masa se haga notable, es necesario que el proceso se mueva a una gran velocidad.[18] Entonces, la masa de un proceso es la suma de su masa en reposo y de la masa debida a la energía cinética de su movimiento.[19] Ahora bien, esta relatividad de la masa puso claramente de manifiesto la estrecha conexión existente entre la masa y la energía, lo mismo que la susceptibilidad de su conversión mutua y equivalente. La masa depende de la energía y, recíprocamente, la energía depende de la masa. En consecuencia, en la física relativista se mantiene la vigencia del principio de conservación de la masa, sólo que conjugado indisolublemente con el principio de conservación de la energía.[20] Así tenemos que la masa se conserva siempre, ya sea como masa o, bien, convertida en energía; y que la energía también se conserva, ya sea como energía o, bien, transformada en masa; en la relación precisa expresada por la ecuación de Einstein: $E = mc^2$. Sin embargo, debemos tener presente que el incremento de la masa es un resultado del movimiento relativo del proceso. Y, por ello, cada partícula aumentará su masa con respecto a las otras partículas que sirven como referencia para determinar su movimiento; mientras que, respecto a la propia partícula en movimiento, son las otras partículas las que experimentan un incremento de su masa.

El incremento que experimenta la masa m de un proceso, cuando se mueve a grandes velocidades, ha sido

[18] En el experimento de Bücherer fue en donde se comprobó por vez primera que la masa del electrón se incrementa con la velocidad.

[19] Se trata de la energía cinética relativista que, a bajas velocidades, se aproxima a la energía cinética clásica.

[20] Por lo tanto, aun cuando no se descarte la posibilidad de que existan formas de energía todavía no conocidas, lo cierto es que podemos determinar la cantidad total de energía que posee un cuerpo, partiendo de la magnitud de su masa. Además, con esta conjugación de la energía y la masa desaparece la necesidad especulativa de considerar la situación de que la energía de algunas partículas fuese nula en ciertas condiciones.

determinado con exactitud mediante una ecuación en la cual figuran la velocidad v y la masa en reposo m_o del proceso, junto con la velocidad de la luz c.[21] Cuando el proceso se mueve a la velocidad de la luz, entonces el denominador de la ecuación tiende a cero y, por ende, la masa m debida al movimiento tiende a un valor infinito. Por eso era que al fotón, considerado como el caso límite de la partícula elemental, se le atribuía una masa en reposo nula.[22] En tal caso, como la energía del fotón –al igual que la de cualquiera otra partícula– está determinada por la ecuación de Einstein, podemos sustituir a m por su valor en la ecuación anterior.[23] De esta manera, la energía cinética queda determinada por la masa y la velocidad, mientras que la energía radiante se determina por la frecuencia y la acción.[24] Estos resultados condujeron al establecimiento de una nueva ley del movimiento para las partículas materiales que se encuentran sujetas a enormes velocidades, en la cual está incluida también la gravitación. Por consiguiente, ha desaparecido la dualidad clásica representada por las leyes del movi-

[21] La ecuación es: $m = \dfrac{m_o}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}$.

[22] La atribución era meramente especulativa y se trataba de un recursos matemático. Lo cierto es que la masa en reposo del fotón ha sido determinada experimentalmente en 1975. Su valor es de: 8 x 10^{-49} gramo. Véase, Leverett Davis, Jr., Alfred S. Goldhaber y Michael Martin Nieto, "Limit on the Photon Mass Deduced from *Pioneer-10*. Observations of Jupiter's Magnetic Field", *Physical Review Letters*, Vol. 35, No. 21, noviembre 24, 1975, pp. 1402-1405.

[23] Así tenemos: $E = \dfrac{m_o c^2}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}$; y entonces, como: $m_o = o$ y $v = o$, la expresión queda en: $E = \dfrac{o}{o}$; y, por consiguiente, puede adoptar cualquier valor finito.

[24] La ecuación correspondiente es: $E = h\nu$; en donde h es la constante universal de Planck y ν es la frecuencia de la radiación.

miento inercial y la ley del movimiento gravitacional, al quedar superada por una sola ley relativista del movimiento, que puede enunciarse de este modo: Todos los procesos se mueven libremente describiendo geodésicas —o sea, las trayectorias que son físicamente más cortas— a través del espacio-tiempo, independientemente de que se consideren regiones situadas en la proximidad de otros procesos o regiones alejadas de cualquiera de ellos en el espacio interestelar. Como se puede advertir, en esta ley relativista quedan comprendidos los campos gravitacionales determinados por la interacción de los procesos, lo mismo que los campos inerciales producidos por la aceleración. Por lo tanto, la ley relativista del movimiento implica físicamente la conservación de la masa, la energía y la cantidad de movimiento. En rigor, tanto el principio de conservación de la masa y la energía, como el principio de conservación de la cantidad de movimiento, se muestran así como aspectos parciales de la conexión directa e indisoluble entre el espacio-tiempo, la distribución de los procesos y su movimiento. Y en este continuo espacio-temporal, la energía y la masa conjugadas representan la componente temporal, en tanto que la cantidad de movimiento representa las tres componentes espaciales.[25]

45. *La masa de las partículas elementales*

En el nivel de las partículas elementales, los procesos físicos muestran características diferentes a las que tienen en otros niveles de la existencia. Uno de los rasgos más importantes es el hecho de que la masa de dichas partículas no es inmutable, sino que es distinta cuando la partícula se encuentra en estado libre de la que tiene cuando forma parte integrante de un átomo y, más aún, también varía de unos átomos a otros. Además, existen igualmente mu-

[25] Como se sabe, la expresión matemática de esta conexión se debe a Minkowski, quien introdujo el tensor energía-cantidad de movimiento en el cual se encuentran conjugados la densidad de energía, el flujo de energía y la densidad de cantidad de movimiento.

chos procesos que resultan extraños respecto a los que ocurren en los niveles de la física clásica o de la física relativista. Tales procesos consisten principalmente en la aparición de nuevas partículas con la consiguiente desaparición de otras, como sucede con la absorción y la emisión de fotones; en el surgimiento y la aniquilación de parejas de electrones, uno positivo y el otro negativo; y en la transmutación recíproca de diversas partículas, como ocurre en la desintegración de mesones, las emisiones *beta,* la descomposición de hiperones y otras semejantes. En todos estos procesos se pone de manifiesto la inestabilidad de la mayoría de las partículas elementales, ya que con excepción del neutrino, el electrón y el protón, todas ellas acaban por desintegrarse hasta llegar a convertirse en alguna de esas tres partículas estables o, bien, se transforman en radiación —esto es, en fotones— o se convierten simultáneamente en ambas cosas. Por supuesto, en ninguno de estos procesos se mantiene invariante la masa de las partículas elementales, sino que se produce siempre una transformación de masa en energía o, al revés, de energía en masa. Al propio tiempo, la explicación de dichos procesos implica la exigencia relativista de la invariancia de la velocidad de la luz y la consideración de los campos de fuerza producidos por las mismas partículas elementales. En consecuencia, tomando en cuenta la equivalencia de masa y energía, la constancia de la velocidad de la radiación y los campos de fuerza, la teoría cuántica de los campos permite describir precisamente esos procesos y calcular la probabilidad con que se producen. De este modo, los procesos que ocurren en las partículas elementales son investigados en su interacción constante con su medio material, a la vez que se les considera de una manera más consecuente con su evolución.

Las partículas elementales han sido clasificadas en varios grupos, tomando como base la magnitud de sus masas. Generalmente, la masa de las partículas elementales es referida a la masa del electrón, cuyo valor es de 9.1055×10^{-28} gramos y que es considerada así como la unidad de masa.

La carga eléctrica de las partículas elementales, cuando no son neutras, tiene siempre el mismo valor, aunque puede ser negativa o positiva.[26] El primer grupo está integrado por los fotones, que tienen una masa en reposo de 0.879×10^{-21} unidades, carecen de carga eléctrica y su espín es de una unidad de cantidad de movimiento angular.[27] A continuación tenemos el grupo de los leptones, formado por el electrón, el muón, la partícula tau, el neutrino-eléctrón, el neutrino-muón, el neutrino-tau y sus respectivas antipartículas, cuyas masas varian entre 5×10^{-4} y 3718.2 unidades, tienen carga eléctrica negativa o positiva, o no tienen, y su espín es de 1/2. Luego vienen los mesones, que son el pión, el kaón, las partículas eta, phi y psi, los mesones encantados y sus antipartículas correspondientes, con masas que van desde 105.6 hasta 3095 unidades, con carga positiva o negativa, o neutros, y con un espín nulo o igual a la unidad. En seguida tenemos los nucleones, que son el protón y el neutrón con sus antipartículas respectivas, cuyas masas son de 1836 y 1838.6 unidades, teniendo el primero carga electrica, en tanto que el segundo no tiene, y ambos con un espín de 1/2. Finalmente se encuentran los hiperones, cuyo grupo está integrado por las partículas delta, lambda, sigma, xi, omega y lambda encantada, más sus antipartículas correspondientes, con masas que van de 1972.6 a 4422.7 unidades, algunas con carga positiva, otras negativa y otras sin carga, y con espines semienteros.[28] Los valores discontinuos que tienen las masas de las partículas elementales y las magnitudes cuánticas de sus cargas eléctricas y de sus cantidades de movimiento angular, se encuentran relacionadas intimamente con la cuantificación de su energía, de su cantidad de movimiento linear y de sus otras características dinámicas. Como es sabido, la cuantificación de la energía y

[26] En unidades elestrostáticas, dicha masa es igual a: 1.60206×10^{-19} coulomb $= 4.8024 \times 10^{-10}$ estatcoulomb; y puede adoptar únicamente los valores: $e+$, 0 y $e-$.

[27] Los fotones son los cuantos de la radiación, que se encuentran siempre en movimiento a la velocidad de la luz y cuya energía varía de acuerdo con su longitud de onda.

[28] O sea, que dicho valor es un múltiplo impar de 1/2 de la unidad de cantidad de movimiento angular.

de las cantidades de movimiento linear y angular también se observa en el caso de los fotones y, según parece, igualmente en los *quarks*. Lo que no se ha encontrado todavía es alguna relación directa entre las masas de las partículas elementales, o las masas de sus componentes los *quarks*, que permitiera explicarlas como distintos estados cuánticos de una masa básica determinada.

Los núcleos de los átomos son partículas compuestas de protones positivos y neutrones, excepto en el caso del núcleo del átomo de hidrógeno ordinario, que está constituido por un solo protón positivo. Por lo tanto, la carga eléctrica del núcleo atómico es igual a la suma de las cargas de los protones que lo integran, los cuales coinciden a su vez en número con los electrones negativos perinucleares y, por ende, con el número atómico del elemento de que se trate. En cambio, la masa del núcleo atómico no es igual a la suma de las masas de los protones y neutrones que lo forman, salvo en el caso del núcleo del hidrógeno liviano. Más precisamente, la masa de un núcleo es siempre menor que la suma de las masas de sus nucleones, y la diferencia entre ambas se conoce con el nombre de defecto de masa. Tal como se ha comprobado experimentalmente, lo que sucede es que al conjugarse los protones y neutrones para formar un núcleo atómico, una parte de su masa se convierte en energía. La magnitud de la masa transformada en energía corresponde exactamente al defecto de masa, y la energía resultante es liberada fuera del núcleo en forma de radiación, o sea, de fotones. Lo que es más, la cohesión de los nucleones se encuentra vinculada directamente con el defecto de masa.[29] Por lo tanto, el defecto de masa es el resultado de una conversión de masa en energía. Por otra parte, la transformación de los fotones de la radiación *gamma* en parejas de electrones, uno positivo y el otro negativo, ocurre en las proximidades del núcleo atómico, que en este caso sirve simplemente como catalizador de la reacción. Sin

[29] Véase la Sección 39.

embargo, para que dicha transmutación se realice, es necesario que el cuanto de energía de los fotones *gamma* sea suficientemente elevado, para que esa energía suministre la masa y la energía en reposo de los dos electrones resultantes, además de la energía indispensable para impartirles cierta velocidad. En este caso también se cumple la ley de conservación de la cantidad de electricidad, ya que la carga total de la pareja de electrones es nula, al igual que lo es la de los fotones. En consecuencia, lo que tenemos en este caso es una conversión parcial de la energía de los fotones *gamma,* misma que se transforma en la masa y la energía de los dos electrones. Y, como es posible comprobar, en todas las transmutaciones y reacciones de desintegración que ocurren entre las partículas elementales, lo mismo que en todos los procesos de integración y de descomposición de los átomos, nos encontramos indefectiblemente con transformaciones recíprocas entre la masa, la energía, la carga y la acción de dichas partículas.

46. *La cantidad de movimiento*

La cantidad de movimiento de un proceso es el producto de su masa por la velocidad con que se mueve: *mv*. Esta relación entre la masa y la velocidad constituye una medida del movimiento; y todos los cambios que ocurren en los estados de movimiento de un conjunto de partículas que se encuentran en interacción, consisten en transferencias mutuas de cantidad de movimiento entre dichas partículas. Además, la cantidad de movimiento sirve también para medir la fuerza, como el cambio que se produce en la cantidad de movimiento de un proceso en un tiempo determinado; lo mismo que para medir la energía, que es proporcional al producto de la cantidad de movimiento por la velocidad; para medir la acción, que es proporcional al producto de la cantidad de movimiento por la distancia; y para medir la potencia que es el producto de la cantidad de movimiento por la aceleración. Por otra parte, al igual de lo que sucede con la fuerza, la efectividad

de la cantidad de movimiento también depende de la distancia. Como es bien sabido, la efectividad de una fuerza que tiende a hacer girar un cuerpo alrededor de un eje, aumenta en proporción directa con la distancia existente entre la fuerza y el eje de giro. Entonces, esa efectividad se mide por el momento de la fuerza, que es el producto de la magnitud de la propia fuerza por su distancia al eje en cuestión. De manera análoga, el momento de la cantidad de movimiento es el producto de la cantidad de movimiento por la distancia entre el cuerpo y el eje de giro. Por ello, el momento de la cantidad de movimiento también se denomina cantidad de movimiento angular.[30] Pues bien, cuando un movimiento mecánico existente en un proceso es transferido en la misma forma a otro proceso, entonces dicha transferencia tiene lugar de acuerdo con la relación del producto de la masa por la velocidad, o sea, que se mide por la cantidad de movimiento, mv. Pero, en cambio, cuando el movimiento mecánico existente en un proceso es transferido a otro proceso convertido en otra forma de movimiento, entonces dicha transferencia es proporcional al producto de la masa por el cuadrado de la velocidad, esto es, que se mide por la energía cinética: $\frac{1}{2} mv^2$. En otras palabras, tenemos así que la cantidad de movimiento representa un movimiento mecánico medido como movimiento mecánico, en tanto que la energía cinética representa al propio movimiento mecánico medido en su capacidad para convertirse en una cantidad equivalente de otra forma de movimiento.[31]

[30] La cantidad de movimiento angular es un vector que está determinado por la cantidad de movimiento de la partícula y el radio vector que la une con el centro de giro. Su dirección es perpendicular a esos dos vectores y su magnitud es igual a la componente de la cantidad de movimiento en dirección normal al radio vector, multiplicada por la longitud de dicho vector.

[31] Más todavía, el efecto acumulativo de una fuerza se puede medir tanto por el cambio que produce en la cantidad de movimiento, como por el cambio que determina en la energía cinética. Véase la Sección 31.

Tal como lo hemos expresado anteriormente, todas las partículas elementales poseen cierta cantidad de movimiento.[32] Incluso la manera de determinar que una partícula elemental ha terminado un proceso de emisión de energía radiante, es mediante la comprobación de que su energía haya decrecido sin que exista ninguna otra causa o, bien, porque se haya producido un cambio en su cantidad de movimiento que tampoco sea atribuible a una causa distinta. Igualmente, un modo de descubrir la existencia de una radiación es por medio de la determinación de la presión que ejerce, esto es, de la cantidad de movimiento que imparte a una partícula elemental. En tal caso, en vez de medir la energía, se mide la cantidad de movimiento impartida a la partícula por la presión de la radiación. Por lo tanto, independientemente de que los fotones carezcan de algunas de las características asociadas a los corpúsculos, el hecho es que tienen una cantidad de movimiento determinada, en la dirección de la propagación de la radiación de la cual forman parte. El efecto Compton suministra, entre otras cosas, una prueba experimental de la existencia de esta propiedad en los fotones.[33] Las magnitudes de la cantidad de movimiento y de la masa del fotón han sido determinadas con precisión, partiendo de su velocidad c, de su frecuencia ν y de su energía $h\nu$.[34] Por otra parte, De Broglie estableció que todas las partículas elementales se encuentran asociadas

[32] La cantidad de movimiento de una partícula elemental está dada por la ecuación:

$$p = \frac{m_o v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

en donde p es la cantidad de movimiento, m_o la masa en reposo, v la velocidad de la partícula y c la velocidad de la luz.

[33] Para mayores detalles, véase más adelante la Sección 56.

[34] Como su energía es: $E = mc^2 = h\nu$, entonces la ecuación respectiva es: $p = mc = \frac{h\nu}{c}$. De donde se desprende que su masa en movimiento es: $m = \frac{h\nu}{c^2}$.

en su movimiento con una onda plana sinusoidal, y que la energía y la cantidad de movimiento de la partícula están conectadas con la frecuencia y la longitud de onda de esa onda, por las mismas relaciones que existen entre las correspondientes propiedades de los fotones y las de las ondas de la radiación.[35]

De acuerdo con las relaciones antes mencionadas, las crestas de la onda se mueven mucho más rápidamente que el corpúsculo.[36] Cuando la velocidad corpuscular es igual a la de la luz, como sucede con los fotones, su velocidad ondulatoria es también la de la luz; y, para velocidades corpusculares pequeñas comparadas con la de la luz, la longitud de onda queda determinada por la constante h de Planck, la masa m y la velocidad corpuscular v.[37] Estas propiedades han sido comprobadas experimentalmente, tanto para los electrones como para las otras partículas elementales; con lo cual han quedado demostradas obje-

[35] Introduciendo la consideración relativista de la energía y la cantidad de movimiento, dichas relaciones son las siguientes:

$$E = \frac{m_o c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = h\nu; \quad p = \frac{m_o v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{h\nu}{V} = \frac{h}{\lambda};$$

en donde E es la energía de la partícula, m_o su masa en reposo, p su cantidad de movimiento, v su velocidad corpuscular, ν la frecuencia de la onda, V la velocidad ondulatoria, λ la longitud de onda, h el cuanto de acción y c la velocidad de la luz. Estas relaciones son covariantes ante una transformación de Lorentz y, por lo tanto, son posibles lógicamente.

[36] La velocidad ondulatoria de la partícula está dada por la ecuación: $V = \frac{E}{p} = \frac{c^2}{v}$; de tal manera que resulta ser mayor que la velocidad de la luz, puesto que: $\frac{c^2}{v} > c$. Pero tal cosa no se encuentra en conflicto con la teoría de la relatividad, ya que la restricción de que la velocidad de la luz sea el límite máximo de las velocidades, se refiere únicamente a la transmisión de energía.

[37] En el caso del fotón, como: $v = c$, queda entonces: $V = \frac{c^2}{c} = c$. Y para las partículas que se mueven con una velocidad menor, la longitud de onda es: $\lambda = \frac{h}{mv}$.

tivamente las ecuaciones que representan las relaciones entre dichas propiedades. Finalmente, cuando una partícula elemental se encuentra en reposo, de modo que su velocidad corpuscular v es nula, entonces resulta que su velocidad ondulatoria y su longitud de onda se hacen infinitas. En tal caso, la onda plana sinusoidal degenera en una onda estacionaria, que se manifiesta como una vibración puntual existente en el espacio que circunda a la partícula. Por consiguiente, la estrecha conjugación entre el aspecto corpuscular y el aspecto ondulatorio que caracteriza a las partículas elementales, se expresa con claridad en las relaciones existentes entre la energía y la cantidad de movimiento y entre la frecuencia y la longitud de onda. O sea, que se expresa nítidamente en las relaciones entre las propiedades corpusculares y las propiedades ondulatorias de las propias partículas elementales.

47. *Conservación de la cantidad de movimiento*

La cantidad de movimiento es una propiedad física que puede variar en un mismo proceso, de acuerdo con los cambios que ocurran en su estado de movimiento. Pero, cuando se considera un sistema aislado o el universo entero, entonces la cantidad de movimiento total se mantiene constante. Esta ley de la conservación de la cantidad de movimiento se refiere tanto a la cantidad de movimiento linear como a la cantidad de movimiento angular. Además, dicha ley representa una expresión tan profunda y objetiva de las propiedades físicas del universo, que se ha podido comprobar experimentalmente su cumplimiento riguroso en la física clásica, en la física relativista y en la física cuántica. Esto significa, en otras palabras que su validez se extiende a las interacciones de todos los procesos, ya sea que se trate de procesos estelares, de procesos comparables a las dimensiones humanas o de procesos microcósmicos. Precisamente el hecho de que las leyes de conservación se cumplan en todos los dominios de la física, ha destacado últimamente su enorme im-

portancia; ya que hay otras muchas leyes clásicas que han debido sufrir modificaciones radicales para poder ser aplicables a los procesos relativistas o cuánticos o, sencillamente, se ha encontrado que no tienen cumplimiento en dichos procesos. Por otro lado, cada una de las leyes de conservación se encuentra conectada con una ley de simetría o, lo que es equivalente, con un principio de invariancia. Así, existe una correspondencia biunívoca entre la conservación de la cantidad de movimiento linear y la invariancia de las leyes físicas ante una translación espacial; y, análogamente, también se tiene una correspondencia biunívoca entre la conservación de la cantidad de movimiento angular y la invariancia de las leyes físicas ante una rotación espacial. Por último, teniendo en cuenta la física entera, tenemos que fundamentalmente existen únicamente tres leyes de conservación: el principio de conservación de la cantidad de movimiento, tanto linear como angular, el principio de conservación y transformación de la masa y la energía, y el principio de conservación de la cantidad de electricidad. Y, por lo demás, dichos principios se encuentran conectados estrechamente entre sí, en virtud de las múltiples relaciones mutuas que enlazan activamente la masa, la energía, la cantidad de movimiento y la carga eléctrica de los procesos existentes.[38]

En el caso de los procesos microcósmicos, el principio de conservación de la cantidad de movimiento ha resultado sumamente fructuoso para la determinación de muchas propiedades de las partículas elementales. Pero, por supuesto, primero fue indispensable que se verificara experimentalmente su cumplimiento en este dominio de la física, lo cual provocó graves dificultades y suscitó numerosas discusiones apasionadas. Tal vez una de las controversias más conocidas a este respecto, fue la que se sostuvo acerca de la interpretación que debería darse al efecto Compton.[39] Como es sabido, dicho efecto consiste en que el choque de una radiación de alta frecuencia —y, por

[38] Véase la Sección 34.

[39] A. H. Compton, *Phys. Rev.*, *21*, 1923, pp. 483-502.

ende, de gran energía— con un cuerpo mesocósmico, hace que la radiación sea desviada en varias direcciones y sufra una disminución en su frecuencia —y, por lo tanto, en su energía—, al propio tiempo que el cuerpo mesocósmico emite electrones con una cantidad de movimiento equivalente a la disminución de energía que se produce en los fotones integrantes de la radiación. El mismo Compton formuló una hipótesis que constituye una explicación cuantitativa de ese efecto,[40] aplicando las leyes de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento al choque entre la radiación y el cuerpo mesocósmico. Por su parte, Bohr formuló otra hipótesis [41] según la cual no habría ninguna conexión causal entre el impacto de los fotones de la radiación y la emisión de los electrones, ni tampoco con respecto a la desviación y la disminución de energía de los propios fotones. De ese modo, Bohr negaba francamente la validez de los principios de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento. Ante la tajante alternativa así planteada, Bothe y Geiger por una parte, y Compton y Simon por otra, planearon experimentos decisivos y los llevaron a cabo.[42] El resultado obtenido en dichos experimentos demostró que la explicación de Compton es la acertada y, entonces, Bohr reconoció que su interpretación era errónea y retiró su hipótesis. En esas condiciones se verificó experimentalmente el cumplimiento riguroso de las leyes de conservación de la cantidad de movimiento y de la energía en los choques entre fotones y electrones. Después se ha verificado igualmente su cumplimiento en todas las interacciones de las partículas elementales. Y, lo que es más, posteriormente se ha encontrado que los principios de conservación sirven de fundamento para explicar algunas de las propiedades cuánticas más importantes.

Los átomos de los distintos elementos químicos consti-

[40] A. H. Compton, *Phys. Rev.*, *22*, 1923, pp. 409-413.

[41] N. Bohr, H. A. Kramers y J. C. Slater, *Phil. Mag.*, 6 S., *47*, 1924, p. 785.

[42] W. Bothe y H. Geiger, *Zeits. f. Physik*, *32*, 1925, p. 639; A. H. Compton y A. W. Simon, *Phys. Rev.*, *26*, 1925, p. 289.

tuyen sistemas estables y aislados, mientras no emiten radiación o absorben energía en esa misma forma o en otra. Por supuesto, dicha estabilidad es relativa, ya que puede ser destruida por la desintegración radiactiva del núcleo, bien sea naturalmente o provocándola de manera artificial. En un átomo estable, su cantidad de movimiento se mantiene constante mientras se encuentra aislado. Por otra parte, el principio de la conservación de la cantidad de movimiento también se cumple durante el proceso de emisión de energía radiante por parte del átomo, puesto que la cantidad de movimiento de los fotones emitidos es igual y opuesta al cambio sufrido por la cantidad de movimiento del átomo. En el caso del choque entre un átomo y otra partícula, cuando la energía de esta última es menor que la requerida para provocar el salto cuántico de un electrón perinuclear a una órbita de mayor energía —es decir, cuando es menor que la energía de resonancia—, entonces el choque se produce como una colisión entre cuerpos perfectamente elásticos.[43] Por lo tanto, la suma de las cantidades de movimiento del átomo y de la otra partícula se conserva igual antes y después del choque, independientemente de que en cada uno de ellos varíe de modo recíproco. En cambio, cuando la energía de la partícula que choca con el átomo es igual o mayor que la energía de resonancia, entonces dicha energía puede ser absorbida por el átomo provocando el salto cuántico de uno de sus electrones y el correspondiente aumento en la cantidad de movimiento del mismo electrón. Como consecuencia de esto, el átomo pasa de su estado estable a un estado de excitación, el cual tiene una duración sumamente breve y termina cuando el electrón excitado vuelve a su órbita estable y la energía que el átomo había absorbido en el choque es emitida en forma de radiación. Por su parte, la otra partícula sale despedida del choque con una cantidad de movimiento menor y que difiere de la que tenía anteriormente, en la magnitud requerida para compensar exactamente la energía absorbida por el átomo. De esa

[43] Véase la Sección 37.

manera, este segundo tipo de choque es semejante a una colisión entre cuerpos blandos y, por ende, no elásticos. Por supuesto, también puede suceder que la energía cinética de la partícula que choca con el átomo sea de tal magnitud que provoque varios saltos cuánticos o que, incluso, produzca la expulsión de un electrón atómico, con la consiguiente transformación del átomo en un ión positivo. Igualmente se pueden producir choques que consisten propiamente en el proceso inverso, cuando el átomo previamente excitado tiene una colisión con otra partícula y entonces, en vez de emitir su energía de excitación en forma de radiación, la transfiere a la otra partícula en forma de energía cinética, provocando un incremento en su cantidad de movimiento. En todos estos casos, como se advierte claramente, se cumplen rigurosamente los principios de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento.

48. *Cuantización de la cantidad de movimiento*

Como ya lo expresamos antes, cuando un átomo se encuentra en estado estable, su cantidad de movimiento angular se conserva constante en magnitud y sentido. Es más, como el núcleo atómico se mantiene prácticamente fijo y carece de movimiento de rotación, resulta que la cantidad de movimiento angular del átomo es igual a las cantidades de movimiento angular de sus electrones. En el caso del átomo de hidrógeno, que tiene un solo electrón perinuclear, su cantidad de movimiento angular es igual al producto de la masa del electrón m por su velocidad v y por su distancia al núcleo r, esto es: mvr. Ahora bien, para poder explicar satisfactoriamente los procesos de absorción y de emisión de energía radiante que ocurren en los átomos, Bohr planteó la necesidad de establecer una condición limitante respecto al movimiento de los electrones atómicos.[44] De acuerdo con dicha condición, los electrones no pueden describir sino ciertas trayectorias privi-

[44] Véase la Sección 11.

legiadas cuyas distancias al núcleo forman una serie de valores discretos y, por lo tanto, cuánticos. Y la condición que determina los valores posibles de esa serie, es justamente el hecho de que la cantidad de movimiento angular del electrón únicamente puede ser la correspondiente a un múltiplo entero de la magnitud $\frac{h}{2\pi}$, en donde h es la constante de Plank y π es la relación entre la circunferencia y el diámetro del círculo. Esta condición crítica de cuantización de la cantidad de movimiento angular ha resultado no ser una mera hipótesis, sino una consecuencia directa de las ecuaciones que expresan los conocimientos adquiridos sobre los procesos microcósmicos.[45] Más aún, de una manera coincidente, la consideración del movimiento ondulatorio de los electrones condujo al descubrimiento de que sus trayectorias atómicas tienen longitudes que son, necesariamente, múltiplos enteros de la longitud de onda de los propios electrones; y dichas longitudes orbitales son precisamente las trayectorias resultantes de la cuantización de la cantidad de movimiento angular.

Tenemos entonces que las cantidades de movimiento angular de los electrones atómicos son múltiplos enteros de la magnitud $\frac{h}{2\pi}$ y, por lo tanto, sus valores forman la serie cuyos términos pueden expresarse por: $n\,\frac{h}{2\pi}$; en donde n puede tomar los valores correspondientes a la sucesión de los números naturales: 1, 2, 3, 4, ... La magnitud $\frac{h}{2\pi}$ es considerada como la *unidad de cantidad de movimiento angular* y el número n se denomina *número cuántico principal.* Pues bien, tomando en cuenta que la cantidad de movimiento angular es igual al pro-

[45] Dicha consecuencia se obtiene directamente tanto en las ecuaciones de la mecánica ondulatoria, como en las de la mecánica de las matrices y en las de la teoría cuántica relativista.

ducto de la masa por la velocidad y por el radio, *mvr*, y que la velocidad v debe tener un valor tal que la fuerza centrífuga sea igual a la atracción electrostática del núcleo, resulta que el radio de la primera órbita electrónica en el átomo de hidrógeno es de 0.527×10^{-8} centímetros, valor que es del orden de magnitud requerido por la teoría cinética de los gases para las dimensiones atómicas. Como en la ecuación que expresa el valor del radio, figura el número cuántico principal n elevado a la segunda potencia,[46] tenemos que los radios de las órbitas subsecuentes se encuentran en una relación proporcional a la serie de los cuadrados de los números naturales; esto es, que la segunda órbita tiene un radio 4 veces mayor que la primera, la tercera 9 veces mayor, la cuarta 16 veces mayor y así sucesivamente. Por otra parte, cada electrón gira como una especie de trompo y, por consiguiente, posee una cantidad de movimiento angular o espín que le es intrínseco y cuyo valor es de un medio de una unidad de cantidad de movimiento angular, $\frac{h}{4\pi}$, y puede tener dos sentidos.[47] A la vez, el electrón tiene también un momento magnético intrínseco en sentido contrario al del espín, cuyo valor es el de un magnetón de Bohr.[48] Además de la condición ya señalada, existen otras tres condiciones cuánticas para las órbitas electrónicas, mismas que se encuentran expresadas por sendos números cuánticos. El *número cuántico azimutal, l,* se refiere al hecho de que la cantidad de movimiento angular total, considerando el movimiento de precesión de la órbita electrónica, tiene que ser también un

[46] La ecuación es: $a_n = n^2 \frac{h^2}{2\pi^2 e^2 m Z}$; en donde a_n es el radio correspondiente a la órbita cuyo número cuántico principal es n, h es la constante de Plank, π la relación entre el diámetro y la circunferencia, e la carga eléctrica, m la masa y Z el número atómico respectivo.

[47] Ya que puede ser paralelo o antiparalelo al campo magnético.

[48] Esto es: $M_o = \frac{eh}{4\pi mc}$. Como es fácil inferir, la relación entre el momento magnético y la cantidad de movimiento angular, es el doble del radio de la órbita correspondiente.

múltiplo entero de la unidad de cantidad de movimiento angular. El *número cuántico magnético, m,* determina las inclinaciones de los diversos planos orbitales con respecto a la dirección del campo magnético, o sea, que expresa la proyección de la cantidad de movimiento angular sobre un eje. Por supuesto, cuando no existe campo magnético, el número cuántico m carece de significado. Finalmente, el *número cuántico interno, j,* expresa el hecho de que el espín del electrón siempre se encuentra orientado normalmente al plano orbital, teniendo uno u otro sentido en esa dirección, de tal manera que representa la cantidad de movimiento angular resultante del espín, expresada en unidades cuánticas.

El número cuántico principal n puede adoptar cualquier valor correspondiente a la serie de los números naturales, de modo que: $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, \ldots$; y sus cambios de valor no están sujetos a ninguna restricción. Para cada valor del número cuántico n son posibles todos los valores del número cuántico azimutal l, con tal que sean menores, o cuando mucho iguales, a una unidad menos que el valor de n; por lo tanto, dichos valores serán: $l = 0, 1, 2, 3, 4, \ldots, (n - 1)$. Pero los saltos cuánticos de los electrones solamente son posibles entre órbitas cuyo número azimutal l difiera en una unidad, o sea, que dicho número puede cambiar en $+ 1$ o en $- 1$. Cuando el número cuántico azimutal l es igual a $(n - 1)$, la órbita electrónica es circular; y, cuando su valor es menor, entonces la órbita es una elipse cuya excentricidad aumenta a medida que l es más pequeño. Respecto al número cuántico interno j, tenemos que su valor es de $1/2$ cuando el número cuántico azimutal l es igual a cero; y, cuando dicho número l es mayor que cero, entonces el número cuántico interno j puede tener los valores $(l - 1/2)$ y $(l + 1/2)$. Por consiguiente, los valores de j son siempre números semi-enteros, esto es, múltiplos impares de $1/2$. Los cambios del número cuántico interno j pueden ser de $+ 1$, de 0 y de $- 1$. Por su parte, el número cuántico magnético m puede adoptar tantos valores como el doble

del valor de j más una unidad, es decir, $(2j + 1)$; de modo que sus valores están dados por la siguiente serie: $m = -j, -(j-1), -(j-2), \ldots, +(j-2), +(j-1), +j$. Entonces, para $j = 1/2$, el número m tendrá dos valores; para $j = 3/2$, tendrá cuatro valores; para $j = 5/2$, existirán seis valores de m; y así sucesivamente. Los cambios del número cuántico azimutal m pueden ser de $+1$, de 0 y de -1; y sus valores serán siempre números semienteros, positivos o negativos.[49]

Tomando en cuenta todas las combinaciones entre las posibilidades que hemos señalado, respecto a los valores de los cuatro números cuánticos n, l, j, m, se puede formar la siguiente tabla, en la cual aparecen las primeras 28 órbitas electrónicas que cumplen con las condiciones de cuantización de la cantidad de movimiento angular:

n	l	j	m
1	0	½	−½
1	0	½	+½
2	0	½	−½
2	0	½	+½
2	1	½	−½
2	1	½	+½
2	1	3/2	−3/2
2	1	3/2	−½
2	1	3/2	+½
2	1	3/2	+3/2
3	0	½	−½
3	0	½	+½
3	1	½	−½
3	1	½	+½
3	1	3/2	−3/2
3	1	3/2	−½

[49] E. Persico, *Fundamentals of Quantum Mechanics*, pp. 252-273.

3	1	½	+½
3	1	½	+½
3	2	½	−½
3	2	½	−½
3	2	½	+½
3	2	½	+½
3	2	½	−½
3	2	½	−½
3	2	½	−½
3	2	½	+½
3	2	½	+½
3	2	½	+½

Por supuesto, el número cuántico principal n puede adoptar valores superiores a 3 y, por ende, el número de órbitas posibles es mucho mayor. Cada una de las combinaciones posibles entre los cuatro números cuánticos define precisamente una órbita cuántica. En virtud del principio de exclusión de Pauli, en cada una de estas órbitas posibles se puede encontrar un electrón, y sólo un electrón; porque no puede haber más de un electrón que tenga el mismo estado cuántico dentro de un sistema o, como es aquí el caso, dentro de un mismo átomo. Pero, es obvio que en cada átomo solamente habrá electrones en tantas de las órbitas posibles como correspondan al número atómico del elemento químico de que se trate.[50] Por ello mismo, es claro que las otras órbitas posibles se encontrarán vacías; salvo en el caso de que el átomo pase a un estado de excitación y uno de sus electrones experimente un salto cuántico para ocupar una de ellas, aun cuando entonces dejará vacía la que antes ocupaba. Ahora bien, lo que es muy importante destacar es el hecho de que los cuatro números cuánticos, el principal, el azimutal, el interno y el magnético, son proporcionales a la unidad de cantidad de movimiento angular. En consecuencia, las

[50] Es decir, que habrá una sola órbita ocupada en los átomos de hidrógeno, dos órbitas en los átomos de helio, tres en los átomos de litio y así, sucesivamente, hasta llegar a 103 órbitas en los átomos de laurencio.

órbitas cuánticas posibles están determinadas completamente por la cantidad de movimiento angular de los electrones perinucleares. Esto es, dicho en otras palabras, que la cuantización de la cantidad de movimiento angular es la que define las cuatro condiciones cuánticas del movimiento de los electrones en el interior del átomo. Y, por lo tanto, la cantidad de movimiento angular desempeña una función fundamental en las relaciones existentes entre las propiedades cuánticas de los electrones atómicos.

49. *Cantidad de movimiento y longitud de onda*

Como ya lo hemos expuesto,[51] existe un límite finito e insuperable respecto a la exactitud de la determinación simultánea, para una y la misma partícula elemental, de una de sus coordenadas espaciales y de la componente de la cantidad de movimiento en esa misma dirección, cuya magnitud es $\frac{h}{4\pi}$ o sea, un medio de la unidad de cantidad de movimiento angular.[52] Por consiguiente, resulta que la cantidad de movimiento y la posición espacial forman una pareja de magnitudes conjugadas, cuya determinación precisa no se puede hacer por separado. Por otra parte, la cantidad de movimiento p de una partícula elemental está determinada por la constante de Planck h y la longitud de onda λ de su propagación ondulatoria, conforme a la relación: $p = \frac{h}{\lambda}$; la cual ha sido comprobada experimentalmente para todas las partículas elementales. Ya hemos advertido cómo el cumplimiento de esta ecuación requiere

[51] Véase la Sección 7.

[52] Las relaciones de incertidumbre que establecen ese límite en cada dirección espacial son, respectivamente:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi}, \qquad \Delta y \Delta p_y \geq \frac{h}{4\pi}, \qquad \Delta z \Delta p_z \geq \frac{h}{4\pi};$$

en donde Δx, Δy, Δz, son las incertidumbres de las coordenadas espaciales, x, y, z; mientras que Δp_x, Δp_y, Δp_z, son las incertidumbres de las respectivas componentes de la cantidad de movimiento en las mismas direcciones, p_x, p_y, p_z.

la consideración simultánea de la cantidad de movimiento y de la longitud de onda, que es una propiedad espacial; y, lo que es más, que es imprescindible operar con valores precisos de dichas magnitudes.[53] En consecuencia, resulta conceptualmente posible y experimentalmente necesario determinar conjugadamente la cantidad de movimiento y la longitud de onda de una partícula elemental. Desde luego, así se plantea la exigencia de considerar a la cantidad de movimiento como otra forma en la cual se manifiesta su longitud de onda y, recíprocamente, que la longitud de onda es otra manera en la que se muestra su cantidad de movimiento. En este sentido, la cantidad de movimiento y la longitud vienen a ser reconocidas como dos formas distintas e inseparables, a través de las cuales se exhiben las propiedades espaciales de las partículas elementales. Su relación lógica queda expresada mediante el siguiente juicio de inclusión: Las propiedades espaciales de las partículas elementales se pueden manifestar como longitud, o como cantidad de movimiento o, bien, como longitud y cantidad de movimiento a la vez. De esta manera quedan satisfechas las relaciones de incertidumbre y las ecuaciones que enlazan directamente la cantidad de movimiento con la longitud de onda.

De acuerdo con el principio de exclusión de Pauli, tenemos que en un mismo sistema jamás puede haber dos o más partículas en el mismo estado cuántico, o sea, que posean la misma cantidad de movimiento y la misma energía. Por lo tanto, tenemos que cada partícula elemental llena por sí sola el sistema entero, puesto que *su presencia se encuentra simultáneamente en todas las posiciones espaciales* incluidas dentro del sistema. Como consecuencia, las partículas elementales tienen la propiedad de ser politópicas, esto es, de ocupar una multitud de lugares al mismo tiempo. Por otra parte, como esto mismo ocurre para todas y cada una de las partículas que forman el sistema, resulta que dichas partículas también tienen la propiedad de ser homotópicas respecto a cada lugar, ya que todas ellas lo

[53] Véase la Sección 8.

ocupan simultáneamente.[54] Dentro del sistema, las partículas se extienden de manera continua y se encuentran en interacción constante y, por ello, una partícula localizada corpuscularmente en un punto cualquiera del sistema, impide que exista otra partícula en el mismo estado cuántico, en virtud de esa continuidad de sus propiedades ondulatorias. En rigor, no existen partículas aisladas o libres, ya que incluso cuando se encuentran separadas por una distancia considerable, las partículas siguen conectadas ineludiblemente con el medio material al cual pertenecen. Este enlace indisoluble entre las partículas elementales y su medio ha quedado comprobado en todos los experimentos y, como no podía menos de suceder, se obtiene también como una consecuencia teórica dentro de los tres aparatos matemáticos que se utilizan en la mecánica cuántica. Por supuesto, dicho enlace se manifiesta justamente a través de la cantidad de movimiento y de la energía de las partículas elementales.

Tomando en cuenta la expresión matemática del movimiento ondulatorio de las partículas elementales, tenemos que cada una de ellas está representada por una onda compleja definida por una descomposición espectral determinada y cuya amplitud se encuentra distribuida, en cada instante, de cierta manera en el espacio. La presencia corpuscular de la partícula se puede manifestar en un punto cualquiera de la región ocupada por la onda, con una probabilidad que es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda en ese punto. Al propio tiempo, a cada una de las componentes monocromáticas que integran la descomposición espectral de la onda, le corresponde un valor posible de la cantidad de movimiento de la partícula. Cuando se trata de una onda monocromática simple, el corpúsculo tiene una cantidad de movimiento bien definida; pero entonces la onda posee la misma amplitud en todos los puntos y se extiende indefinidamente en el espacio. Por consiguiente, queda incierta la posición corpus-

[54] Véase la Sección 13.

cular de la partícula, ya que puede manifestarse con la misma probabilidad en cualquier punto de la región espacial ocupada por la onda y, por lo tanto, la partícula se muestra con una politopía homogénea. Por otro lado, cuando la onda ocupa una región sumamente pequeña del espacio, fuera de la cual su amplitud es nula, entonces la posición corpuscular se encuentra bien determinada. Pero, en tal caso, se trata de una onda puntual o vibración, que es el resultado de la superposición de ondas monocromáticas de todas las longitudes de onda posibles y, por ello, la cantidad de movimiento de la partícula puede tener entonces todos los valores posibles. En esas condiciones tenemos que, cuando hay certidumbre acerca de la posición, existe la mayor incertidumbre sobre la cantidad de movimiento, y viceversa. En otras palabras, la precisión de la localización espacial de una partícula es una consecuencia de la superposición de muchas ondas, lo cual trae aparejada la homotopía de los aspectos corpusculares respectivos; mientras que la precisión de la cantidad de movimiento es una consecuencia de la politopía homogénea de la partícula, la cual se manifiesta en el caso de que se trate de una onda monocromática simple. De esta manera, la oposición entre la cantidad de movimiento y la longitud de onda, tanto en su separación relativa como en su conjugación, se pone de manifiesto en la distinción que se produce entre la politopía y la homotopía de las partículas elementales.

50. *Conjugación de las propiedades dinámicas*

El desplazamiento de la energía produce en los procesos una cantidad de movimiento que se agrega a la cantidad de movimiento propia de dichos procesos.[55] Esta cantidad de movimiento adicional p se encuentra determinada por la masa en reposo m_o y la velocidad de la partícula v, la velocidad de la luz c, la longitud de onda λ y la cons-

[55] Véase la Sección 46.

tante h de Planck.[56] En el caso de los fotones, cuya masa en reposo se consideraba nula por las razones antes expuestas, se acostumbra determinar su cantidad de movimiento por la relación entre el cuanto de acción h y la longitud de onda λ. Como consecuencia, tenemos que entre la cantidad de movimiento y la energía existe una conexión tan íntima que el movimiento de la energía hace surgir la cantidad de movimiento del fotón y aumenta la cantidad de movimiento de las otras partículas elementales. Por otro lado, en los choques que ocurren entre los átomos y las partículas elementales, lo mismo que en los procesos de desintegración y de transmutación de unas partículas en otras, tenemos una multitud de ejemplos ilustrativos de la conversión de energía radiante en cantidad de movimiento y, recíprocamente, de la transformación de cantidad de movimiento en energía radiante. En la física relativista, la cantidad de movimiento y la energía se encuentran fundidas en una unidad, de la misma manera en que lo están el espacio y el tiempo. Por lo tanto, además del vector tetradimensional (x, y, z, t) en el cual están conjugados el espacio y el tiempo, existe también otro vector tetradimensional (p_x, p_y, p_z, $-E$) cuyas magnitudes conjugadas son las componentes de la cantidad de movimiento y la energía.[57] En la propia mecánica relativista, la relación directa entre la energía y la cantidad de movimiento está dada por una ecuación bien determinada.[58] Por consi-

[56] La ecuación correspondiente es: $p = \dfrac{m_o v}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}} = \dfrac{h}{\lambda}$.

[57] En donde: $E = mc^2$, $p_x = mv_x$, $p_y = mv_y$, $p_z = mv_z$. La dimensión de este vector es:

$$\sqrt{E^2 - c^2(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)} = \sqrt{m^2c^4 - m^2c^2v^2} = m_o c^2$$

[58] Dicha ecuación es: $E^2 = c^2p^2 + m_o^2c^4$; en donde c es la velocidad de la luz, p la cantidad de movimiento, m_o la masa en reposo y E la energía total de la partícula en movimiento, incluyendo su energía en reposo. Ahora bien, cuando la masa en reposo m_o es tan pequeña que su producto por la velocidad de la luz, $m_o c$, resulta insignificante comparado con valor de p, entonces se puede despreciar el término $m_o^2c^4$, quedando

guiente, de la misma manera que la posición espacio-temporal representa el aspecto ondulatorio de la partícula elemental, así también su energía y su cantidad de movimiento representan su aspecto corpuscular.

Cuando se determinan la energía y la cantidad de movimiento de una partícula elemental, entonces se observa que, mientras mayor es la precisión que se consigue, más difuso se hace el corpúsculo a través de una enorme región del espacio-tiempo. Análogamente, cuando se determina la posición espacio-temporal de una partícula elemental, entonces se observa que mientras más precisa se hace la determinación de su aspecto ondulatorio, se manifiesta con mayor claridad su aspecto corpuscular. En consecuencia, tenemos que la determinación de las propiedades cinemáticas —esto es, espacio-temporales— y la determinación de las propiedades dinámicas —la cantidad de movimiento y la energía— de una partícula elemental, parecen ser dos planos diferentes de la realidad que no es posible enfocar al mismo tiempo.[59] Porque, cuando la partícula se enfoca en uno de esos planos con la mayor exactitud, lo que se observa es justamente el otro aspecto con la mayor nitidez, y viceversa. Solo que, precisamente por eso, en vez de tratarse de una exclusión mutua entre los dos planos, el cinemático y el dinámico, lo que se tiene es destacadamente una conexión incluyente e ineludible entre ellos. Y tal enlace es tan íntimo, que no está establecido únicamente entre el espacio-tiempo y la energía-cantidad de movimiento, sino que igualmente existe entre el tiempo y la energía, por una parte, y entre el espacio y la cantidad de movimiento, por otra. En rigor, la conservación de la energía de una partícula elemental se puede interpretar entonces, indistintamente, como conservación de la fre-

la ecuación aproximada: $E^2 \backsimeq c^2p^2$; o, lo que es lo mismo: $E \backsimeq cp$. En el caso extremo de los fotones, cuando se considera: $m_o = 0$, entonces la ecuación se vuelve enteramente exacta y, por lo tanto, su energía es igual a su cantidad de movimiento multiplicada por la velocidad de la luz, o sea: $E = cp$.

[59] Véase la Sección 9.

cuencia de su movimiento ondulatorio;[60] y, también, la conservación de la cantidad de movimiento se puede considerar como conservación de la longitud de onda de la propia partícula.

Por último, debemos referirnos a la síntesis resultante de las parejas de propiedades conjugadas de las partículas elementales, que son: espacio-tiempo, espacio-cantidad de movimiento, energía-cantidad de movimiento y energía-tiempo. Estas cuatro parejas forman, en realidad, una sola magnitud continua: espacio-tiempo-cantidad de movimiento-energía. Por consiguiente, la conjugación dialéctica de las propiedades de las partículas elementales hace que éstas se manifiesten indistintamente por la conservación de su extensión, de su cantidad de movimiento, de su energía y de su oscilación, lo mismo que por la transformación mutua entre dichas formas de existencia. Esta conjugación se encuentra representada explícitamente en las ecuaciones fundamentales de la mecánica cuántica, lo cual significa que las cuatro propiedades en cuestión están enlazadas, teórica y experimentalmente, de todas las maneras posibles. Por lo tanto, la conexión compleja entre dichas propiedades, se expresa en la relación pentadecagonal que hemos establecido con anterioridad entre ellas.[61] En la conjugación de estas propiedades fundamentales, las partículas elementales cumplen estrictamente con los principios de conservación de la energía, de conservación de la masa, de conservación de la cantidad de movimiento linear y de conservación de la cantidad de movimiento angular, tanto por lo que se refiere a su manifestación separada como en lo que respecta a sus enlaces recíprocos. Y también se cumple rigurosamente el principio de transformación mutua entre las cuatro propiedades en cuestión. En cierto modo, la pareja conjugada espacio-cantidad de movimiento representa destacadamente la conservación de las propiedades de los procesos microcósmicos; mientras que la pareja energía-tiempo representa de manera conspicua la transfor-

[60] Véanse las Secciones 18 y 36.

[61] Véase la Sección 19.

mación de esas propiedades. Sin embargo, se trata simplemente de una expresión relativa, puesto que también se conservan estrictamente la energía y el tiempo, e igualmente se transforman rigurosamente el espacio y la cantidad de movimiento. En fin, debido a la objetividad de la conjugación dialéctica entre dichas propiedades, tenemos que las partículas elementales se manifiestan indistintamente por la conservación de su extensión, su cantidad de movimiento, su energía y su oscilación, lo mismo que por la conversión recíproca entre estas cuatro formas primordiales de su existencia.

VI

LA CATEGORÍA DE CAUSALIDAD

51. *Noción de la causalidad*

La causalidad constituye la expresión particularizada de la conexión y la acción recíproca existentes entre todos y cada uno de los procesos del universo. En rigor, cada proceso se encuentra conectado con los demás de una manera múltiple y polimorfa; ya sea de un modo directo, por contigüidad, o indirectamente, a través de otros procesos concatenados. Igualmente, en cada proceso existe una interdependencia y una conexión íntima entre todos y cada uno de sus elementos y aspectos; siendo esta conexión intrínseca la que produce la unidad del proceso. A la vez, la conexión universal entre los procesos y en el interior de los procesos es una relación activa y recíproca. Los movimientos y los cambios de cada proceso influyen en las transformaciones y los movimientos de los otros procesos y, a su vez, reciben la influencia de ellos. Esta acción recíproca es una causalidad multívoca entre los procesos, que se condicionan mutuamente. Así, una acción produce como efecto otra acción; pero al propio tiempo, el efecto actúa a su vez sobre la acción que lo causa. De esta manera, toda acción es simultáneamente efecto y causa, en sus múltiples relaciones con otras acciones; y existe una transferencia continua de causa y efecto en la transmisión recíproca de las acciones. Entonces, determinando las formas del movimiento del universo y las relaciones activas entre ellas, es como se conoce al propio universo en su mayor y más profunda objetividad. Al mismo tiempo, partiendo de la acción recíproca universal es como se puede llegar a determinar con rigor la conexión de causalidad. Porque, considerando a los procesos en su separación relativa, dentro de su interconexión general, es como se destacan los cambios de movimiento

y las transformaciones en las cuales algunos de ellos se muestran como causas y otros como efectos.[1]

La conexión y la acción recíproca entre los procesos se expresan en el orden y la regularidad del universo y constituyen, en estricto sentido, el significado originario del propio universo como un cosmos, o sea, como un todo ordenado y articulado en su actividad, la cuál está regulada por leyes inmanentes. En todo caso, la causalidad es una manifestación de la acción recíproca universal entre los procesos, que permite explicar sus múltiples relaciones, simplificándolas abstractamente. Así, la causalidad representa una serie parcial de las vinculaciones más destacadas en un grupo de procesos, cuando este grupo se considera separado relativamente al resto de procesos del universo. En cambio, cuando los procesos son considerados con todas sus conexiones, dentro de su articulación activa en el conjunto del universo, entonces las causas y los efectos se convierten mutuamente unos en otros y cambian continuamente su función relativa en los diversos vínculos que los unen. Por otra parte, la acción recíproca a que nos referimos también existe entre el conocimiento y los procesos conocidos; ya que las manifestaciones de los procesos existentes son las que producen como efecto el conocimiento científico y, a su vez, los conocimientos adquiridos sirven de base para provocar otras manifestaciones de dichos procesos objetivos. Por todo esto, cuando la categoría de causalidad queda establecida como síntesis de los conocimientos logrados en la investigación científica y tiene como contenido objetivo a las manifestaciones de la conexión universal, entonces permite indagar y explicar las relaciones activas y recíprocas entre los procesos existentes en el universo.

52. *El determinismo clásico*

En su consideración clásica, el determinismo es una de las características fundamentales de la mecánica newtoniana,

[1] F. Engels, *Dialéctica de la naturaleza*, pp. 240-242.

que se puede formular sencillamente de la siguiente manera: Cuando se conocen con precisión las condiciones en que se encuentra un proceso físico en un instante cualquiera y, además, se conocen las leyes que gobiernan su comportamiento, entonces es posible prever rigurosamente las condiciones en que ese mismo proceso se encontrará en cualquier otro instante futuro, o las condiciones en que se encontraba en cualquier instante pasado. Matemáticamente, este determinismo de los procesos físicos se expresa como una propiedad analítica de las ecuaciones de la mecánica clásica, ya que éstas tienen siempre soluciones enteramente definidas para todos los valores del tiempo. Desde luego, la vigencia del principio determinista en la física, implica necesariamente el reconocimiento del orden y la regularidad existentes en el universo. A su vez, esta regularidad de la naturaleza se manifiesta en la existencia de las leyes naturales que gobiernan las distintas clases de procesos y que se expresan, de manera aproximada, en las leyes físicas. Sin embargo, debido a su generalidad, dichas leyes únicamente condicionan las posibilidades del comportamiento de los procesos, pero no describen concretamente ningún desenvolvimiento específico futuro de un proceso determinado, ni suministran tampoco información precisa alguna acerca del desarrollo individual de un proceso en el pasado. Por esto es que, aun cuando siempre es indispensable conocer las leyes que gobiernan la actividad de un proceso, este conocimiento no es suficiente para predecir la evolución del proceso o para saber cómo transcurrió su historia. Y lo mismo ocurre respecto al conocimiento de las condiciones específicas en que se encuentra el proceso, que también es imprescindible, pero tampoco es suficiente por sí solo. Por lo tanto, únicamente con la conjugación de ambos conocimientos —el de las leyes y el de las condiciones específicas— es como el problema del determinismo queda planteado de manera necesaria y suficiente.

Así, por ejemplo, cuando se considera un proceso mecánico formado por partículas materiales que se mueven

libremente bajo la acción de sus atracciones gravitatorias recíprocas, tenemos que contar con el conocimiento de las leyes que gobiernan su evolución —que son las tres leyes newtonianas del movimiento y la ley de la gravitación universal—, junto con el conocimiento de las posiciones y las velocidades de las partículas que constituyen el proceso, en un instante determinado. Entonces, partiendo de las condiciones iniciales y aplicando a ellas las leyes generales, es posible predecir teóricamente las posiciones y las velocidades que adquirirán las partículas componentes del proceso en cualquier instante futuro; y, también, es posible establecer con exactitud esas determinaciones con respecto a los instantes pasados. Como se advierte, tenemos aquí un marcado contraste entre la contingencia de las condiciones iniciales y la permanencia necesaria —y, por ende, opuesta y contradictoria a la contingencia— de las leyes físicas. Porque el instante en el cual se fijan las posiciones y las velocidades de las partículas materiales —esto es, el instante que se considera como inicial— se escoge libremente, e incluso al azar, entre el conjunto de instantes posibles; mientras que las leyes que gobiernan su evolución —la cual seguirá distintos derroteros, conforme a las condiciones seleccionadas como iniciales— son siempre las mismas. Y, no obstante, el resultado de esa conjugación entre las condiciones contingentes, pero definidas, y las condiciones necesarias que se encuentran expresadas en las leyes —las cuales no definen ningún caso específico en particular—, tiene un carácter de indudable necesidad, tal como se acusa en la formulación misma del principio físico del determinismo. De este modo, la evolución de cada proceso físico se encuentra gobernada por leyes rigurosas que, combinadas con las condiciones iniciales concretas, determinan inequívocamente todos los estados pasados y futuros del proceso. Y así desde un punto de vista teórico, la historia del proceso queda enteramente determinada por las leyes naturales y por las condiciones particulares en que se encuentra en un instante cualquiera de su desenvolvimiento.

53. *Convergencia hacia el determinismo*

No obstante lo que acabamos de exponer, ya en la propia física clásica tropieza con algunas restricciones la concepción del determinismo. En primer lugar, debemos tomar en cuenta que el presente físico nunca es un instante sin dimensión —aunque lo podamos considerar así aproximadamente en muchos casos, por analogía con la definición del punto geométrico—, sino que implica siempre un lapso más o menos corto, pero de cierta duración. Por lo tanto, las condiciones tomadas como iniciales no son estrictamente instantáneas, ya que corresponden a cierto intervalo de tiempo, en el cual queda incluida cierta evolución del proceso en cuestión. De otra parte, para el cumplimiento del determinismo es indispensable que los efectos de las condiciones iniciales persistan en el tiempo, aun cuando su magnitud o su intensidad varíen, de tal manera que no puede tratarse de condiciones accidentales; y, con esto, se limita y precisa la libertad que realmente puede existir en la selección de dichas condiciones. Por otro lado, se necesita tener un conocimiento suficiente de todas las condiciones que producen efectos susceptibles de ponerse de manifiesto en el nivel o contexto dentro del cual se considera al proceso en cuestión; lo cual impone un rigor mayor todavía en la selección que venimos examinando. Más aún, incluso suponiendo que se tenga una selección justa y un conocimiento suficiente de las condiciones escogidas, seguirá subsistiendo la posibilidad de que haya otras condiciones exteriores al proceso, o extrañas al nivel o contexto considerado, que produzcan perturbaciones no previstas. En rigor, la única manera de tomar en cuenta todas esas influencias externas o ajenas, sería la de considerar a la totalidad del universo, ya que ninguna porción de éste se encuentra estrictamente aislada de las demás. Pero tal consideración es irrealizable, puesto que jamás podremos llegar a conocer exhaustivamente al universo, por más que cada vez lo conozcamos más y mejor. No obstante, lo que sí es posible hacer es

considerar que algunos procesos limitados, tales como el sistema solar por ejemplo, se encuentran aislados en forma muy aproximada, porque las influencias externas resultan ser muy pequeñas comparadas con las influencias internas, y las acciones provenientes de otros niveles o contextos no los afectan de manera manifiesta en muchos respectos. Por consiguiente, en lo que se refiere a estos procesos relativamente aislados y dentro de cierto nivel o contexto de la existencia, es como se considera el cumplimiento riguroso y suficientemente aproximado del determinismo físico.

Ahora bien, la obligada aproximación a que nos referimos, no surge únicamente en el caso del determinismo, sino que se presenta indefectiblemente en la aplicación de toda ley científica, dentro del dominio entero del conocimiento y en todos los niveles de la existencia. Y, lo que es más, también en la medición de las condiciones iniciales, lo mismo que en la verificación de las condiciones finales, se plantea el problema de su aproximación. Porque la medición científica es siempre imperfecta, dado que está afectada ineludiblemente de errores experimentales, por más que el ingenio científico y la técnica estén logrando continuamente reducirlos en la práctica y eliminarlos a través del cálculo racional. Y, por otro lado, en cualquier observación se introducen siempre factores extraños al proceso —entre los cuales figuran como los más ostensibles, aunque no siempre sean los más importantes, los intrumentos utilizados para la medición— que lo perturban y destruyen su aislamiento. Además, las mismas imprevisiones que se pueden establecer a partir de esos datos imperfectos, implican necesariamente cierta imprecisión. Sin embargo, a todo esto tenemos que agregar el hecho innegable de que la precisión de las observaciones se mejora continuamente, con el refinamiento de los procedimientos empleados y el perfeccionamiento de los instrumentos de medición. Por lo tanto, a medida que avanza el conocimiento científico, el principio del determinismo se comprueba en forma cada vez más aproximada y en

condiciones más rigurosas. Y como, en cuanto a su carácter lógico, el principio del determinismo no difiere en nada de los otros principios científicos, tenemos que el determinismo ha mostrado con toda precisión, en el curso del desarrollo de la ciencia, su tránsito desde un carácter primario de simple postulado, hasta su conversión en fundamento del conocimiento ya logrado. Por eso mismo, el determinismo no solamente sirve para establecer previsiones acerca del comportamiento de los procesos físicos, sino que el propio principio constituye un elemento integrante de toda explicación científica que se formula, incluso desde la etapa de la hipótesis. Entonces, podemos decir que el determinismo es un límite al cual converge, en este sentido, el conocimiento científico. Y, dentro del dominio de la física clásica, resulta ser enteramente consecuente la consideración de que la previsibilidad de los acontecimientos futuros se hace más precisa, en tanto mayor sea la exactitud de las observaciones practicadas y de que, por su parte, dicha exactitud crece prácticamente de manera ilimitada.

54. *La causalidad en la física relativista*

Con la teoría de la relatividad se abandonó la concepción clásica del tiempo absoluto y el espacio absoluto, considerados como independientes entre sí y como si fueran autónomos respecto a las otras propiedades de los procesos existentes. En su lugar, se estableció la concepción unitaria mucho más profunda y objetiva, del espacio-tiempo constituido por las propiedades mismas de los procesos y que, por consiguiente, depende de la distribución de sus energías y masas y de sus respectivas transferencias y transformaciones. Por lo tanto, el espacio-tiempo actúa como un campo de fuerzas. De esta manera se simplificó el problema de determinar las leyes físicas, ya que es suficiente con definir las trayectorias de las partículas en movimiento, para tener determinadas así las dos clases de leyes consideradas en la física clásica: las leyes del movi-

miento y las leyes del campo de fuerzas. Por otra parte, la teoría de la relatividad se basa en el principio de la invariabilidad de las leyes físicas, cualquiera que sea el sistema inercial tomado como punto de referencia. Así, cuando dos procesos del mismo tipo, referidos a sistemas inerciales distintos, se reproducen en condiciones idénticas, entonces el desarrollo de ambos procesos es también idéntico en los dos sistemas. Por consiguiente, al ser conocidas las condiciones iniciales de un proceso, en un sistema cualquiera, se puede seguir con precisión su desenvolvimiento dentro del espacio-tiempo de cuatro dimensiones. De esta manera se establece la unidad entre la estructura causal y la estructura espacio-temporal del universo. Y, así, la explicación de la teoría de la relatividad mantiene la consideración del desarrollo causal de los procesos, en el sentido riguroso del determinismo, ya que, en un instante dado, los valores asumidos por ciertos parámetros adecuados permiten, en principio, determinar estrictamente el comportamiento de los procesos del universo.

Por otro lado, en la teoría de la relatividad también permanece intacta la consideración de la objetividad de la relación entre el proceso observado y el observador, con el mismo rigor que en la física clásica. Porque, aun cuando se ha puesto en claro que la simultaneidad entre dos acontecimientos depende de la posición ocupada por el observador, no obstante, es igualmente cierto que nada cambia en el desarrollo de los procesos cuando el observador es sustituido por un instrumento de registro o, incluso, cuando no hay observador alguno. De este modo, la relatividad de la simultaneidad no introduce ninguna insuficiencia en el conocimiento científico, ni admite válidamente interpretaciones subjetivistas.[2] Ahora bien, debido a la

[2] Análogamente, el descubrimiento de la imposibilidad de determinar simultáneamente con precisión la cantidad de movimiento y la posición de una partícula elemental —o bien, su energía y su situación temporal—, tampoco representa una insuficiencia radical para el conocimiento científico, ni puede ser tomado rigurosamente como base de la interpretación subjetivista formulada por los físicos de la Escuela de Copenhague. Véanse a este respecto las Secciones 8 y 18.

existencia de un límite superior en la transmisión de la acción, resulta que, cuando los procesos se encuentran demasiado alejados, no puede haber entre ellos acciones recíprocas inmediatas y menos aún pueden existir vínculos causales directos. Por consiguiente, en ese caso, las relaciones causales directas entre los procesos dejan de tener un carácter universal. Entonces, las relaciones causales quedan limitadas por la condición de que la distancia entre los procesos no exceda de la longitud que puede abarcar la transmisión de la acción, durante el tiempo que dura el desenvolvimiento de los procesos, desde su surgimiento hasta su desaparición. De este modo, se establecen regiones espacio-temporales dentro de las cuales existen relaciones causales directas entre los procesos; y, así, se muestra nuevamente cómo la causalidad es una expresión particular y limitada de la acción recíproca universal. Sin embargo, si consideramos que cada proceso está conectado causalmente con una multitud de procesos que forman una sucesión temporal, tanto hacia el pasado como en dirección al futuro, que va desde lo más inmediato hasta lo infinitamente remoto, entonces podemos advertir que estas cadenas causales no quedan limitadas por las regiones espacio-temporales antes dichas, sino que se extienden al universo entero aunque de manera mediata. Además, el surgimiento de cada proceso en el universo se produce siempre por la transformación de otros procesos y, por su parte, la desaparición de cada proceso consiste justamente en su conversión en otro o en otros procesos diferentes. De esta manera, a la cadena ilimitada de las transmisiones de acción, debemos agregar la sucesión igualmente ilimitada de las transformaciones entre los procesos, incluyendo su surgimiento y su desaparición. Como consecuencia, en estos dos sentidos, los procesos se desenvuelven dentro de un encadenamiento causal riguroso y universal; ya que las causalidades locales existentes dentro de los límites permitidos por la velocidad de la transmisión de la energía, se encuentran conectadas causalmente de modo cualitativo y cuantitativo. Y, por lo tanto, con la explicación relativista

de los procesos existentes, ni siquiera se ha puesto en cuestión el cumplimiento de la causalidad, inclusive en su aspecto cuantitativo del determinismo físico.

55. *El indeterminismo de la teoría cuántica*

En el caso de la teoría cuántica, la situación respecto a la causalidad y el determinismo es muy diferente a la relatada para la teoría de la relatividad. Desde su establecimiento a principios de nuestro siglo y hasta la tercera década del mismo, el estudio científico del nuevo nivel de la existencia se caracterizó por la intensa investigación acerca de los procesos microcósmicos descubiertos con creciente rapidez y de sus correspondientes conceptos, junto con la formulación de las leyes también nuevas que rigen su comportamiento. Pero, a partir del establecimiento de la mecánica cuántica en 1926, con la consiguiente utilización de los instrumentos matemáticos adecuados al punto de vista de la estructura teórica adoptada, la atención de muchos físicos se concentró en la rigorización y la generalización del aparato de la mecánica cuántica, sin que se hiciera nada fundamentalmente nuevo respecto al examen de los principios en que se basa la propia teoría. Por el contrario, los esfuerzos se enderezaron decididamente hacia la formulación de interpretaciones rígidas, a las cuales se les atribuyó un carácter absolutamente definido e inmutable y se les erigió, por lo tanto, en una especie de dogmas indiscutibles. Con respecto a esta estructura "ortodoxa" dada a la teoría cuántica, es que se ha deducido la naturaleza indeterminista "en principio" de los procesos microcósmicos y que se han podido hacer tantas especulaciones acerca de la supuesta imposibilidad "radical" de conocerlos objetivamente. Este intento de resucitar las "verdades absolutas y definitivas" de la ciencia, y precisamente en un campo de estudio en el cual se acababa de romper implacablemente con ellas por imposición de los hechos descubiertos experimentalmente, resultó bastante extraño y apresurado. Además, pronto se empezaron a

acumular nuevos descubrimientos experimentales en forma abrumadora, para cuya explicación resultó insuficiente la teoría cuántica elaborada con tantas presunciones. Por fin, en 1952, los trabajos de David Bohm iniciaron el rompimiento decidido con esa anómala situación y, aun cuando todavía no se ha podido elaborar una nueva teoría que permita explicar suficientemente todos los procesos conocidos experimentalmente, lo que sí es indudable es que la interpretación puramente probabilística de la Escuela de Copenhague tiene que ser abandonada.[3]

En cuanto a la naturaleza indeterminista que se atribuye a los procesos microcósmicos, la clave de tal interpretación se encuentra en el llamado "principio de complementariedad", establecido mediante la tergiversación de las relaciones de incertidumbre de Heisenberg. De acuerdo con dichas relaciones, las partículas elementales tienen objetivamente la propiedad de que su posición espacial y su cantidad de movimiento, lo mismo que su energía y su posición temporal, se encuentran enlazadas intrínsecamente de un modo tan estrecho que resulta imposible determinar experimentalmente, de manera simultánea y con la misma precisión, a tales parejas de magnitudes. En rigor, lo que no es posible es determinar simultáneamente la componente de la cantidad de movimiento en una dirección y la coordenada espacial en esa misma dirección o bien, la posición temporal y la energía de una partícula, con una precisión ilimitada. Porque existe un límite finito, determinado con toda exactitud y que no se puede traspasar, para la precisión que es posible alcanzar al medir simultáneamente esas parejas de magnitudes. En este sentido, la propiedad objetiva expresada por las relaciones de incertidumbre hace que el curso de la convergencia hacia una estricta previsibilidad, de la cual hablamos antes, se interrumpa bruscamente y sin remedio.[4] En consecuencia, para el caso de los procesos microcósmicos, queda excluida la posibilidad de sostener el determinismo

[3] Véase la Sección 3.
[4] Véase la Sección 53.

a la manera clásica, como un límite al cual converge continuamente el conocimiento científico. Sin embargo, esta conclusión no tiene nada que ver con las absurdas especulaciones a que conduce la interpretación complementarista. De ellas ya nos hemos ocupado anteriormente,[5] demostrando que: la relación entre las parejas de magnitudes complementarias es incluyente, y no excluyente; y que no sólo es conceptualmente posible, sino también experimentalmente necesario el determinar a la vez dichas parejas de magnitudes, para una y la misma partícula elemental. En realidad, una de las más conspicuas insuficiencias de la teoría cuántica "ortodoxa" es la de tratar de conservar a toda costa las categorías de la física clásica en el nivel de los procesos microcósmicos, cuando existen pruebas abrumadoras de su falta de cumplimiento en este nivel. Así, se insiste reiteradamente en que la única manera de determinar el estado dinámico de una partícula elemental, consiste en seguir el procedimiento clásico de fijar simultáneamente por separado su cantidad de movimiento y su posición espacial, por ejemplo; y, después, aduciendo la imposibilidad de realizar la medición precisa de ambas magnitudes a la vez, se concluye formalmente el derrumbe del determinismo en ese nivel, en la física entera y en todos los dominios de la existencia.[6]

Ahora bien, tal como ya lo expusimos,[7] el determinismo físico exige que se tenga un conocimiento preciso de las condiciones iniciales del proceso considerado y, al mismo tiempo, un conocimiento suficiente de las leyes que gobiernan su comportamiento. Veamos entonces qué ocurre en este sentido con la teoría cuántica "ortodoxa". En primer lugar, el hecho expresado por las relaciones de incertidumbre nos indica, justamente, la imposibilidad de adquirir un conocimiento preciso y simultáneo de todas las

[5] Véanse las Secciones 4, 7 y 18.

[6] Para lo cual se pasan enteramente por alto muchas cosas, entre ellas el hecho de que la propia teoría cuántica sí permite conocer con exactitud el estado de un sistema de partículas elementales, por medio de su función de estado, la cual es una función rigurosamente determinista.

[7] Véase la Sección 52.

condiciones que son consideradas clásicamente como indispensables, para establecer el determinismo en las partículas elementales. Por otro lado, partiendo de una forma inicial de la onda asociada al corpúsculo, la ecuación de propagación permite calcular exactamente la evolución de esa onda durante todo el tiempo en que no se produce alguna nueva observación o medición. Y, por lo tanto, es posible prever teóricamente en cada instante la probabilidad de encontrar cierto valor para cualquiera de las magnitudes asociadas al corpúsculo, si se hiciera en ese instante una medición que permitiera determinarlo. No obstante, cuando se efectúa realmente una nueva medición, ésta suministra nuevos conocimientos sobre el estado del corpúsculo, con lo cual cambia completamente la situación respecto a las probabilidades; tal como sucede con la probabilidad de un acontecimiento cualquiera cuando se adquieren otras informaciones sobre él. En ese caso, se hace necesario construir una nueva onda asociada para representar el nuevo estado de nuestro conocimiento acerca del corpúsculo. Y, así, cada experiencia provoca una perturbación en el estado del corpúsculo, que impide establecer una relación causal cuantitativamente exacta entre el estado anterior y el estado posterior. O sea que, dentro del marco de las observaciones espacio-temporales, en el cual el corpúsculo tiene magnitudes susceptibles de ser medidas, sólo una de estas magnitudes adquiere un valor definido cada vez y, además, los valores futuros no son previsibles con precisión ni por completo. En cambio, dentro del esquema matemático de la función ondulatoria —que, según la "ortodoxia" de la Escuela de Copenhague, escapa por entero a la verificación experimental y únicamente puede ser comprendido a través de nuestro pensamiento—, tenemos que la evolución de la onda asociada está completamente determinada por su forma inicial y por la ecuación de propagación; y, por consiguiente, en el intervalo entre dos medidas, la partícula elemental obedece a un determinismo riguroso.

De este modo, en la teoría cuántica "ortodoxa" se utiliza

un instrumento matemático determinista, para superponerlo a la naturaleza supuestamente indeterminista de la realidad objetiva. Y, como la descripción espacio-temporal de los procesos microcósmicos y su representación por medio del simbolismo matemático son consideradas como alternativas mutuamente excluyentes, resulta entonces que la ecuación de la propagación ondulatoria no expresa las leyes objetivas que gobiernan el comportamiento de los procesos microcósmicos. Por ende, tampoco se cumple con la otra exigencia ineludible del determinismo físico, puesto que se desconocen las leyes que rigen la evolución de los procesos considerados. Más todavía, debido a que la ejecución de una nueva medición hace necesaria la construcción de una nueva onda asociada, para representar el nuevo estado de nuestro conocimiento sobre el corpúsculo, advertimos que es enteramente imposible la comprobación de las previsiones especulativas que se hayan establecido acerca de la evolución de la onda. En resumen, tenemos que no se conocen las condiciones iniciales, ni tampoco son conocidas las leyes que gobiernan el desarrollo de los procesos y, por si esto no fuese suficiente, también es estrictamente imposible someter a prueba experimental las previsiones calculadas matemáticamente. En consecuencia, podemos afirmar que en la teoría cuántica "ortodoxa" no se cumple ninguno de los tres requisitos que son indispensables para la aplicación del determinismo. En rigor, ni siquiera se puede pretender que dicha explicación "ortodoxa" sea indeterminista y, menos aún, que sean indeterministas los procesos microcósmicos; ya que, para ello, sería necesario que se cumplieran los tres requisitos señalados y que entonces, y sólo entonces, se comprobara que las previsiones deterministas no se cumplen experimentalmente. De esta manera, podemos concluir sencillamente que la teoría "ortodoxa", al no poder abordar el problema del determinismo físico, ha optado por mantenerse realmente al margen de la cuestión, sólo que adoptando la posición de rechazar lo que no puede comprender, y a lo cual ha dado la denominación de "indeterminismo cuántico". En otras palabras,

a lo más que ha llegado es al punto de no poder decidir si existe o no existe determinismo en los procesos microcósmicos. Y esta insuficiencia teórica y práctica de la teoría cuántica "ortodoxa" es la que se proclama irracionalmente como "demostración" del indeterminismo.

56. *La causalidad en los procesos microcósmicos*

En la forma original de la teoría cuántica, Bohr sostenía que los procesos microcósmicos individuales no están gobernados por ley causal alguna y, en particular, negaba toda validez a las leyes de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento. Este punto de vista hizo crisis en relación con la interpretación del efecto Compton.[8] Como es sabido, cuando una radiación de alta frecuencia choca con un objeto mesocósmico, la radiación es desviada en varias direcciones y sufre un descenso en su frecuencia, al mismo tiempo que el objeto emite electrones. La interpretación de Compton fue la de considerar que la radiación está formada por fotones,[9] los cuales chocan elásticamente con los electrones del objeto y, como consecuencia de ello, salen despedidos con menor energía en distintas direcciones, a la vez que algunos electrones del objeto mesocósmico son emitidos también debido a los mismos impactos. Entonces, aplicando a dichas colisiones las leyes de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento y considerando, a la vez, que estas leyes establecen una relación causal precisa entre el impacto de un fotón y la emisión de un electrón por el objeto, Compton pudo formular una explicación cuantitativa del proceso observado. En cambio, de acuerdo con la interpretación de Bohr, no existiría conexión causal alguna entre la llegada del fotón y la emisión del electrón, de tal manera que los fotones serían

[8] Véase la Sección 47.

[9] En efecto, tal como lo formuló teóricamente Einstein y después se comprobó experimentalmente, la radiación —que abarca desde las ondas hertzianas hasta los rayos *ultragamma,* incluyendo la luz visible— está constituida por fotones que viajan a la velocidad de la luz y que difieren en cuanto a su longitud de onda, su frecuencia y su energía.

emitidos enteramente al azar. Ante estas dos interpretaciones en conflicto agudo, se hizo necesario planear un experimento decisivo, haciendo que los electrones emitidos y los fotones desviados fueran recibidos en cámaras de ionización adecuadas, en donde se podía registrar inequívocamente su entrada. La alternativa planteada era la siguiente: si Compton estaba en lo justo, la penetración de un electrón y un fotón sería simultánea en las respectivas cámaras de ionización; en cambio, si la interpretación de Bohr fuera la correcta, las penetraciones de electrones y fotones ocurrirían independientemente y al azar. Pues bien, la realización del experimento[10] demostró que las penetraciones simultáneas son mucho más frecuentes de lo que se podría esperar con arreglo a las leyes de la probabilidad. Es más, cuando se toman en cuenta los efectos parásitos, las penetraciones simultáneas se convierten en regla general. De esta manera, el resultado del experimento demostró el acierto de la interpretación hecha por Compton. Por lo tanto, se comprobó experimentalmente que las leyes de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento se cumplen rigurosamente en los impactos individuales entre fotones y electrones. A la vez, como las leyes de conservación se encuentran conectadas en forma indisoluble y recíproca con los principios de invariancia[11] y, por consiguiente, son particularizaciones de las leyes causales, podemos decir que el experimento referido constituye una verificación de la existencia de una causalidad rigurosa en los procesos microcósmicos individuales.

En otros casos, aunque no es posible establecer un determinismo riguroso en el comportamiento de los procesos microcósmicos individuales, siempre se puede descubrir la existencia de conexiones causales rigurosas, tanto para los conjuntos de procesos como para los procesos individuales. Para explicar esto, vamos a referirnos a una clara

10 W. Bothe y H. Geiger, *Zeits. f. Physik, 32,* 1925, p. 639.
11 Véase la Sección 34.

ilustración presentada por De Broglie.[12] Supongamos que tenemos un "disparador de electrones", esto es, un dispositivo que nos permite emitir a voluntad electrones de energía conocida. Dicho disparador lo utilizamos para bombardear una superficie de cristal, frente a la cual se encuentra colocada una pantalla fluorescente en la que se produce una centelluela instantánea a la llegada de cada electrón. Así, cuando emitimos electrones con lentitud, observamos cómo las centelluelas se suceden en el tiempo y se producen en diversos puntos de la pantalla. Pero entonces es imposible prever exactamente, en un instante determinado, cuál será el punto de la pantalla en donde se producirá la siguiente chispa. Lo único que se puede hacer es calcular la probabilidad de que en tal o cual punto de la pantalla se observe la próxima centelluela, sin que sea posible determinar con precisión el comportamiento individual de un electrón. En cambio, si lanzamos electrones con gran rapidez, de modo que el cristal sea alcanzado constantemente por un torrente de electrones, entonces, en cada instante tendremos un centelleo continuo y las chispas se distribuirán en la pantalla dibujando las figuras de difracción, que podemos calcular precisamente en cada caso. En esas condiciones, podemos anticipar exactamente cuál va a ser el aspecto de la pantalla fluorescente cuando se hace funcionar el disparador a tiro rápido. Y, por consiguiente, para el conjunto de muchísimos electrones, existe indudablemente una previsibilidad rigurosa y podemos afirmar entonces que se cumple el determinismo de un modo estricto. Por otra parte, cuando el disparador empieza a funcionar, veremos aparecer centelluelas en ciertos puntos de la pantalla, cuya densidad dependerá enteramente de la frecuencia con que hagamos los disparos. Más precisamente aún, por cada electrón disparado tendremos una chispa y, recíprocamente, cada chispa corresponderá a un electrón. Por lo tanto, cuando el disparador de electrones no funcione, es indudable que

[12] L. de Broglie, *Continu et discontinu en physique moderne*, París, Albin Michel, 1941, pp. 59-64.

no aparecerá centelluela alguna; mientras que cuando disparemos un solo electrón, aparecerá también una sola centelluela. Entonces, debido a esta relación biunívoca entre los electrones disparados y las chispas, podemos decir que el funcionamiento del disparador de electrones es la causa del centelleo en la pantalla y, en rigor, que cada electrón disparado es la causa directa de que aparezca una chispa en la pantalla; aún cuando no podamos prever exactamente cuál de las centelluelas posibles será la que se produzca específicamente cuando pongamos en acción el disparador y lancemos un electrón. En consecuencia, podemos afirmar fundadamente que en este caso sí se cumple estrictamente la causalidad. Esto quiere decir que en el comportamiento de los procesos microcósmicos individuales se cumple rigurosamente el determinismo, en su aspecto cualitativo de concatenación entre causas y efectos; no obstante que no se pueda decir lo mismo acerca de su aspecto cuantitativo. Esta conclusión sobre el cumplimiento indudable y estricto de la causalidad, se puede extender congruentemente a todos los problemas análogos que se han suscitado en torno al comportamiento de los procesos microcósmicos.[13] Lo cual implica que, incluso suponiendo irreductible el indeterminismo de las presentes formas de la teoría cuántica, lo cierto es que en los procesos microcósmicos se cumple rigurosamente la causalidad.

57. *Caracterización contemporánea de la causalidad*

De acuerdo con los resultados de las investigaciones científicas contemporáneas, la causalidad se puede expresar en la forma de una implicación recíproca entre dos conjuntos de procesos, vinculados de tal modo que la producción de

[18] Este cumplimiento riguroso de la causalidad en los procesos microcósmicos, es completamente independiente del fruto que puedan llegar a tener los trabajos que se realizan actualmente con el propósito de establecer una interpretación determinista y objetiva de la mecánica cuántica, para superar las graves inconsecuencias en que se encuentra la teoría cuántica "ortodoxa".

un proceso perteneciente a uno de estos conjuntos traiga aparejada la producción de un proceso perteneciente al otro conjunto. Si representamos a los dos conjuntos por *A* y *B*, respectivamente, podemos formular la causalidad como sigue: *Si se produce un proceso del conjunto* A, *entonces se produce un proceso del conjunto* B; *y, viceversa, si se produce un proceso del conjunto* B, *entonces se produce un proceso del conjunto* A. En esta mutua implicación, tanto *A* como *B* representan conjuntos de procesos que pueden ser incluyentes o excluyentes entre sí. Es decir, que algunos de los procesos del conjunto *A* pueden coexistir temporalmente, cuando son incluyentes; mientras que puede haber otros procesos que solamente existan sucesivamente, cuando son excluyentes. Y lo mismo se aplica a los procesos del conjunto *B*. Así, cuando se produce uno o varios procesos del conjunto *A*, siempre se produce uno o varios procesos del conjunto *B;* y, a su vez, la producción de un proceso o varios del conjunto *B*, provocará siempre cambios en los procesos del conjunto *A* ya producidos o, incluso, puede suscitar la producción de otros procesos en el conjunto *A*.

Como se puede advertir, la implicación causal es simétrica en cuanto a la conexión funcional, o sea, que los procesos *A* son determinantes de los procesos *B*, a la vez que los procesos *B* son determinantes de los procesos *A*. Con lo cual resulta que tanto los procesos *A* como los *B* son, simultánea y recíprocamente, determinados y determinantes entre sí. Debido a esto, nunca se puede considerar a uno de los conjuntos integrantes de esta implicación como exclusivamente determinante del otro conjunto, ni tampoco se puede tener al otro conjunto como simplemente determinado por el primero. Sin embargo, respecto a la intensidad de la determinación, la implicación causal es generalmente asimétrica, esto es, que los procesos *A* pueden ser determinantes de los procesos *B* en un grado mayor de lo que los procesos *B* sean determinantes de los procesos *A*, o viceversa. Por otra parte, las conexiones causales son irreflexivas, porque se trata de relaciones que

no se pueden aplicar a un proceso aislado,[14] o sea, que ningún proceso es causa única de sí mismo, ni tampoco es el único efecto de sí mismo. Pero, a la vez, las conexiones causales son reflexivas, puesto que todo proceso es parcialmente causa y efecto de sí mismo; y, más aún, siempre es posible considerar como unitario a un conjunto complejo de procesos, el cual tenga como elementos integrantes a las causas y los efectos. Igualmente, las cadenas causales son transitivas, ya que si los procesos *A* son causas de los procesos *B* y éstos, por su parte, son causas de otros procesos *C*, entonces los procesos *A* son causas mediatas de los procesos *C*; y, de modo correspondiente, los procesos *C* son efectos mediatos de los procesos *A*.

En realidad, como todos los procesos existentes se encuentran en acción recíproca, la conexión causal se puede establecer entre todos y cada uno de los conjuntos de procesos. Pero, no todas las conexiones recíprocas existentes tienen la misma importancia dentro del nivel o contexto considerado. De hecho, en cada nivel, la magnitud de los efectos de la mayoría de esas acciones recíprocas es tan pequeña que puede dejarse de tomar en cuenta. Por lo tanto, en cada nivel o contexto de la existencia, únicamente se consideran aquellas acciones que producen consecuencias considerables. Debido a ello es que la causalidad representa un aspecto parcial de la acción recíproca universal. Ahora bien, en las acciones recíprocas destacadas por su importancia como implicaciones causales, casi siempre resulta que la magnitud de los efectos producidos en los dos conjuntos implicados no es comparable —debido a la exagerada asimetría de la función de determinante, respecto a la función de determinando—, sino que lo más común es que los procesos de uno de los conjuntos tengan mayor influencia sobre los procesos del otro conjunto. Entonces, al conjunto de procesos cuya influencia es dominante —y que, por lo tanto, es el que gobierna la relación

[14] Desde luego, no existen procesos aislados en el universo y, por lo tanto, aquí nos referimos simplemente al aislamiento relativo en que es posible considerar abstractamente un proceso.

de causalidad por su función de determinante— es al que denominamos causa; y, de modo correspondiente, damos el nombre de efecto al otro conjunto de procesos —en el cual prevalece la función de determinando y, por ello, se encuentra subordinado en mucho a la influencia del otro. En todo caso, ni las causas ni los efectos, pueden ser conocidos *a priori,* sino que deben ser encontrados concretamente en cada ocasión en los procesos objetivos implicados. Por consiguiente, uno de los problemas fundamentales de la investigación científica consiste en descubrir cuáles son los conjuntos de procesos que, en un nivel de la existencia y en un contexto determinado, influyen notablemente sobre otros conjuntos de procesos, sin que sufran a su vez cambios importantes debido a la influencia recíproca de sus efectos.

Por otro lado, la variaciones de los procesos pertenecientes al conjunto considerado como causa y las correspondientes a los procesos integrantes del conjunto tenido como efecto, pueden ser continuas dentro de cierto intervalo de tiempo, al cual puede seguir uno o varios pasos bruscos por discontinuidad, hasta alcanzar otro intervalo temporal de continuidad, y así sucesivamente. Pero no por esto se tiene, necesariamente, una correspondencia biunívoca entre el carácter continuo o discontinuo de las variaciones en los dos conjuntos. Ya que una variación continua de los procesos de un conjunto, puede corresponder a una variación continua o discontinua de los procesos del otro conjunto y, también, una variación discontinua de un conjunto puede implicar una variación discontinua o continua del otro conjunto. A más de esto, la manifestación de la acción causal es histórica, es decir, que siempre transcurre cierto intervalo de tiempo entre la variación de los procesos de un conjunto y la variación producida en los procesos del otro conjunto. Esto se debe, en primer lugar, al hecho de que la transmisión de la acción se realiza, cuando mucho, a la velocidad de la luz; y, en segundo lugar, a que antes de que se manifiesten exteriormente los efectos producidos en un proceso, es in-

dispensable que se efectúen determinadas transformaciones internas en el mismo proceso, las cuales requieren también del transcurso de cierto tiempo. No obstante, cuando el intervalo de tiempo transcurrido es suficientemente pequeño, se puede considerar relativamente como instantánea a la manifestación de la acción causal. Además, este carácter histórico significa que las transformaciones causales son irrepetibles, relativamente y en lo particular, para un espécimen determinado. Pero, a la vez, dichas transformaciones se repiten constantemente en el seno del universo, en cuanto a que constituyen la conexión entre dos conjuntos de procesos y cada uno de ellos está formado por una multitud de especímenes. En fin, no debemos olvidar que la formulación anterior es enteramente general y que, por lo tanto, en cada caso concreto se debe contar con el conocimiento específico de las leyes que gobiernan a los conjuntos de procesos en cuestión, de las características peculiares del nivel de la existencia al cual pertenecen y de las condiciones precisas que definen el contexto en que se encuentran.

58. *Temporalidad de las conexiones causales*

Las causas y los efectos se advierten por su sucesión temporal, a la vez que las conexiones causales se establecen a través de la transformación y la transferencia de energía, que es una propiedad temporal.[15] Por consiguiente, el tiempo constituye el orden de las concatenaciones de causalidad.[16] Las relaciones causales se ordenan mediante la distinción temporal entre lo anterior y lo posterior, ya que la causa antecede al efecto y, a su vez, el efecto procede

[15] Véase la Sección 18.

[16] El orden temporal es invariante ante las transformaciones de Lorentz cuando, y sólo cuando, los sistemas de referencia en cuestión pueden ser conectados por medio de señales —es decir, a través de discontinuidades en la transmisión de la energía que media entre causa y efecto— y, en consecuencia, por concatenaciones causales. A la vez, la inversión del orden temporal únicamente es posible respecto de aquellos procesos cuya conexión causal no es manifiesta.

de la causa. De este modo podemos analizar con mayor detalle las relaciones de causalidad. Así, un conjunto de procesos *A* está conectado causalmente con otro conjunto de procesos *B*, en los siguientes casos: 1) cuando los procesos del conjunto *A* son causas de los procesos del conjunto *B;* 2) cuando los procesos del conjunto *B* son causas de los procesos del conjunto *A;* 3) cuando algún conjunto de procesos *C* es causa común de los procesos de los conjuntos *A* y *B;* 4) cuando otro conjunto de procesos *D* es efecto común de los procesos de los conjuntos *A* y *B;* 5) cuando existe una implicación causal recíproca entre el conjunto *A* y el conjunto *B;* y, 6) cuando los conjuntos *A* y *B* se encuentran, respectivamente, en conexión causal mutua con otro conjunto u otros conjuntos de procesos. En todos los casos, los conjuntos de procesos que se encuentran en relación causal directa son colindantes en el tiempo y, entre ellos, distinguimos como causa al antecedente y como efecto al consecuente. Además, las causas directas son contemporáneas de sus efectos, al menos parcialmente; o sea, que la causa directa comienza antes del efecto y permanece durante una parte del tiempo que dura el efecto. Por otra parte, como ya lo hemos dicho, la concatenación causal se establece mediante la transmisión y la transferencia de energía, cuya velocidad máxima es la de la luz; y, entonces, siempre transcurre cierto intervalo de tiempo entre el surgimiento de la causa y la producción del efecto. Por otro lado, la repetición de una causa trae consigo la repetición del efecto; y cada reiteración de una cadena causal tiene idéntica duración. Más aún, dentro de ciertos límites, que se pueden precisar en cada caso, la intensificación de la causa provoca la intensificación del efecto; y, viceversa, la atenuación de la causa implica la reducción del efecto. De esta manera, con el conocimiento de las relaciones causales y de la posibilidad de su repetición en condiciones definidas, el hombre tiene uno de los medios mejores y más eficaces para intervenir en el curso de los procesos, provocando e induciendo la presentación de las causas productoras de efectos deter-

minados, y procurando la conveniente intensificación o atenuación de esos efectos.

El establecimiento de una previsión, con base en el conocimiento de una conexión causal, entraña ineludiblemente la proyección del pasado conocido hacia el futuro por conocer. Esto significa que, establecer una previsión es tanto como transladar lo ocurrido en un cierto intervalo de tiempo ya transcurrido a otro intervalo temporal por transcurrir. Tal cosa implica necesariamente la consideración de que el tiempo es homogéneo y congruente, y de que posee un sentido único e irreversible.[17] La causalidad se puede expresar matemáticamente por medio de una función, en la cual la variable independiente es la causa y la variable dependiente es el efecto. En rigor, toda función matemática es una expresión abstracta de la causalidad, en la que se puede hacer caso omiso de la secuencia temporal; y es precisamente por ello que la conexión de causalidad no queda definida completamente por el concepto matemático de función en general. Además, las funciones matemáticas admiten la inversión, debido a su simetría; y, por lo tanto, en ellas no queda definido el sentido temporal único que es inherente a la causalidad. Pues bien, debido a que todas las leyes físicas se expresan cuantitativamente en forma de funciones matemáticas, tenemos que la causalidad se encuentra contenida implícitamente en las leyes físicas, aunque de manera abstracta e insuficiente. De manera análoga, en las ecuaciones matemáticas que representan a las leyes físicas, muchas veces las propiedades del tiempo están formuladas de modo abstracto e incompleto. Pero, cuando se abandona la abstracción y se incluye el orden del tiempo en la expresión funcional de las leyes físicas, entonces la conexión causal queda formulada explícitamente y en su integridad. Y, recíprocamente, en aquellas funciones en las cuales el tiempo está representado abstractamente, la inclusión de la conexión causal hace que se determine de manera explícita un orden definido.

[17] Véase la Sección 21.

Debido a que la velocidad de la transmisión causal está limitada por la velocidad de la energía radiante, puede ocurrir que un conjunto de procesos *J* no sea causa ni efecto de otro conjunto de procesos *K*, cuando la distancia que los separa sea tan grande que la energía no se pueda transmitir oportunamente de *J* a *K*, ni tampoco de *K* a *J*. Esto significa que la acción recíproca entre dos conjuntos de procesos, cuya manifestación más conspicua es la relación de causalidad, tiende a ser nula contemporáneamente, cuando los conjuntos de procesos se alejan indefinidamente entre sí. En tales casos no es posible establecer un orden temporal definido. Por lo tanto, nos encontramos aquí con un hecho recíproco al que ya hemos apuntado antes. Es decir, que la causalidad tiene inherentemente un orden definido y que este orden es compartido por la sucesión temporal cuando, y sólo cuando, se puede incluir en el tiempo la conexión causal.[18] Con todo, debido a la acción recíproca existente entre todos los procesos, resulta que los procesos contemporáneos tienen siempre causas comunes mediatas en el pasado, así sean extremadamente remotas, a pesar de que en el momento considerado no exista directamente una conexión causal entre ellos. De este modo, es posible considerar la causalidad universal como una generalización de las causalidades locales, o sea, de las concatenaciones causales existentes dentro de las proximidades permitidas por la velocidad máxima de la transmisión de la energía. Por último, es importante destacar que entre las leyes físicas, unas se refieren explícitamente a la formulación de conexiones causales, como la ley de la conservación y la transformación de la energía; otras expresan definidamente el comportamiento de los procesos físicos sin determinar su sentido, como sucede con la mayor parte de las leyes de la mecánica clásica, de la relativista y de la cuántica; y otras

[18] Esto mismo también es aplicable, en último extremo, al orden espacial; ya que un lugar *X* se encuentra más cerca de *Y* que de *Z*, cuando una señal luminosa directa —o sea, la cadena causal más rápida— transmitida de *X* a *Z*, pasa antes por *Y*.

más indican inequívocamente el sentido en que se desarrollan los procesos sin admitir su reversibilidad, como ocurre con algunas de las leyes referentes al comportamiento de los procesos microcósmicos colectivos y de los procesos termodinámicos.[19] Por lo tanto, en todas las leyes físicas se encuentran explícitas o implícitas las conexiones de causalidad, así sea en forma abstracta e incompleta.

59. *Relaciones causales multívocas y biunívocas*

Una característica general de las relaciones causales, puesta en claro acusadamente en los procesos microcósmicos, es la de que la correspondencia entre causa y efecto no es estrictamente biunívoca. Porque, cuando existe conexión causal directa entre los conjuntos de procesos A y B, entonces un proceso cualquiera del conjunto A puede producir como efecto alguno o varios de los procesos B_1, B_2, B_3, ...; y, a su vez, cada uno de estos procesos del conjunto B puede ser causado por alguno o varios de los procesos A_1, A_2, A_3, ... Por lo tanto, la relación causal es multívoca en ambos sentidos. Esto queda ejemplificado con la ilustración presentada por De Broglie,[20] en la cual podemos considerar que los electrones emitidos por el disparador constituyen los procesos del conjunto A y las centelluelas que aparecen en la pantalla fluorescente son los procesos del conjunto B. Así, el disparo de un electrón, que es un proceso A cualquiera, produce como efecto una de las chispas B_1, B_2, B_3, ...; y, por otra parte, una chispa en particular, que es un proceso B cualquiera, puede ser causado por alguno de los electrones disparados A_1, A_2, A_3, ... En consecuencia, entre el conjunto de procesos A, formado por los electrones emitidos, y el conjunto de procesos B, integrado por las chispas producidas en la pantalla, se cumple rigurosamente el determinismo. De este modo, cada uno de los procesos del conjunto A se encuentra conectado multívocamente con los efectos B_1,

[19] Véanse las Secciones 23 y 56.

[20] A la cual nos referimos en la Sección 56.

B_2, B_3, ...; y, también, cada proceso del conjunto B está relacionado multívocamente con las causas A_1, A_2, A_3, ... Por lo tanto, las relaciones de causalidad pueden ser: *de efectos multívocos,* cuando un mismo proceso es causa de varios procesos o de un solo proceso que no es posible determinar unívocamente dentro de un conjunto de procesos semejantes; *de causas multívocas,* cuando un mismo proceso es efecto de varios procesos o de uno solo de ellos, pero sin que se pueda determinar con univocidad dentro del conjunto al cual pertenece; *de efectos multívocos y causas multívocas a la vez,* cuando varios procesos de un conjunto o uno solo de ellos que no se puede determinar unívocamente, son la causa de varios procesos de otro conjunto o de uno solo de ellos que tampoco se puede determinar de manera unívoca; y *de causa y efecto biunívocos,* que es el caso límite del determinismo riguroso, cuando un proceso bien determinado de un conjunto es la causa de un proceso igualmente bien determinado de otro conjunto, de manera que el segundo proceso es efecto del primero y únicamente del primero, en tanto que el primer proceso es causa del segundo y sólo del segundo.

Desde luego, todas las relaciones causales cualitativas son multívocas en ambos sentidos; mientras que las conexiones cuantitativas de causalidad pueden ser de efectos multívocos, de causas multívocas o, simultáneamente, de causas y efectos multívocos. En todo caso, cuando se conoce una relación de multivocidad de causas y otra de multivocidad de efectos, acerca de ciertos conjuntos de procesos, entonces el avance del conocimiento tenderá siempre a enlazar esas dos relaciones en una conexión única. Por otro lado, el carácter objetivamente multívoco de las causas y los efectos en las relaciones de causalidad, es lo que permite obtener conocimientos suficientemente aproximados sobre los procesos del universo, sin necesidad de tomar en cuenta todas las acciones recíprocas que se producen constantemente en el universo. Además, a medida que un efecto producido por varias causas —o bien, los diversos efectos de una misma causa— se considera con mayor de-

talle o en un contexto más amplio, se advierte cómo cada causa produce alguna diferencia en el efecto —o como cada efecto pone de manifiesto cierta variación en la causa común. Por ello, en el estudio de las relaciones causales se sigue el procedimiento científico de examinar un conjunto de procesos paso a paso, de tal modo que cada paso suministre los elementos necesarios para realizar el estudio más profundo, detallado y extenso que conduce al siguiente paso.[21]

Dentro del marco general de las relaciones causales multívocas, tanto respecto a las causas como a los efectos, la reducción del margen de multivocidad requiere indispensablemente la consideración de factores causales nuevos y cualitativamente diferentes. Por lo tanto, la reducción del número de causas directas o del número de efectos también directos, implica ineludiblemente el tomar en cuenta efectos y causas mediatos; o sea, que obliga a establecer cadenas causales con más de dos términos, en las cuales cada proceso es efecto de uno anterior y, a la vez, causa de otro posterior. Y, mientras más se estreche la multivocidad, más prolongada será la concatenación causal tomada en cuenta; de tal manera que, cuando se alcanza el límite de la relación biunívoca entre causa y efecto, la cadena de causas anteriores y efectos posteriores se prolongará infinitamente en ambos sentidos. Por esto es que la relación biunívoca de causalidad, correspondiente al determinismo clásico,[22] constituye una idealización que nunca se realiza de manera completa en el conocimiento de los

[21] Así fue como resultó posible estudiar las leyes físicas de los procesos mesocósmicos, antes de conocer las leyes de la física microcósmica, debido al carácter multívoco que tienen las manifestaciones estadísticas de los procesos microcósmicos, lo cual permite considerar con cierta autonomía a las leyes del nivel mesocósmico. En forma similar, actualmente se trabaja incesantemente para conocer las leyes que rigen los procesos nucleares y poder formular la teoría correspondiente; además, ya se está penetrando teóricamente en el nivel más profundo, constituido por los componentes de las partículas elementales, es decir, los *quarks*.

[22] El caso más aproximado que se conoce es el de un sistema mecánico aislado que se pueda tratar con arreglo a las leyes newtonianas del movimiento.

procesos existentes.[23] Por ello es que no se conoce un solo caso en el cual se haya logrado establecer una relación causal biunívoca perfecta, que permitiera formular predicciones con una precisión ilimitada, sin necesidad de tomar indispensablemente en cuenta otros factores causales cualitativamente diferentes, que existen fuera del contexto considerado o en otros niveles de la realidad objetiva.

60. *Interconexión de azar y causalidad*

La determinación más detallada y precisa de una relación de causalidad implica necesariamente la consideración de causas mediatas y de efectos indirectos, cuya indagación acaba por llevar fuera del contexto considerado en el planteamiento inicial del problema. Por otra parte, el avance de la investigación científica ha impuesto la necesidad de reconocer que los distintos procesos del universo se encuentran organizados objetivamente en diferentes niveles de la existencia.[24] Además, cada nivel forma parte de la subestructura interna de los niveles más elevados; y, de manera recíproca, las propiedades de los procesos que se producen en cada nivel dependen de las condiciones fundamentales presentes, las cuales están determinadas a la vez por las propiedades de los niveles más elevados, por las de los niveles internos y por las del propio nivel en cuestión. De esta manera, cada nivel se distingue cualitativamente de los otros, sin perjuicio de la estrecha interrelación de dependencia mutua existente entre las propiedades de todos y cada uno de los diferentes niveles de la realidad objetiva. Ahora bien, todos los conocimientos

[23] La conexión biunívoca del determinismo clásico es una aproximación idealizada: 1) porque un sistema mecánico jamás se encuentra totalmente aislado; 2) porque, aun cuando estuviese aislado, siempre habría perturbaciones provenientes de las acciones que se producen incesantemente en su interior, en el nivel molecular, ya que el sistema no puede estar aislado de sí mismo; y, 3) porque si tomáramos en cuenta las acciones moleculares, todavía quedarían sin considerar las perturbaciones provocadas por los procesos atómicos existentes en el interior de las moléculas y así, sucesivamente, en otros niveles más profundos que también contiene.

[24] Véase la Sección 5.

científicos son representaciones abstractas del desarrollo y la transformación de los procesos existentes. Solo que dicha abstracción no es arbitraria, sino que está limitada por la exigencia ineludible de que los conocimientos representen las propiedades fundamentales de los procesos objetivos dentro de cierto contexto, con un grado adecuado de aproximación y en correspondencia con las condiciones que distinguen cualitativamente al nivel de la existencia considerado. Por esto es que los conocimientos relativos a las conexiones causales aplicables dentro de un contexto determinado, no permiten establecer predicciones enteramente rigurosas con respecto al comportamiento de los procesos pertenecientes a otros contextos.

En realidad, toda relación que se cumple necesariamente en un contexto finito de condiciones, se encuentra sujeta a las contingencias que surgen independientemente de dichas condiciones. Esta independencia de las contingencias hace que su fluctuación sea al azar, en forma muy compleja y dentro de un amplio margen de posibilidades. Sin embargo, en muchos casos se pueden despreciar los efectos de dichas contingencias, sin que eso afecte notablemente el grado de aproximación de las relaciones causales establecidas, con tal que se tenga siempre en cuenta su carácter condicional. En todo caso, las fluctuaciones azarosas tienen la tendencia a cancelarse mutuamente, haciendo que los efectos de las contingencias se manifiesten, colectivamente y en promedio, de una manera regular y susceptible de determinarse con gran aproximación. Esta determinación se establece por medio del cálculo de las probabilidades, que constituye la formulación matemática de las leyes del azar. En cierto sentido, las probabilidades expresan también una conexión de causalidad, puesto que permiten partir de las condiciones colectivas en que se encuentra un conjunto de procesos, para prever definidamente las condiciones también colectivas en que se encontrará después ese mismo conjunto. Así, las principales diferencias con la causalidad consisten en que, en el dominio de la probabilidad se desconocen o se ignoran deli-

beradamente las leyes que gobiernan concretamente el comportamiento de los procesos y, además, en que la determinación se establece cuantificando con exactitud las posibles alternativas de su comportamiento colectivo.

Las conexiones causales descubiertas en el curso de la investigación científica, tienen cumplimiento en la medida en que se cancelan los efectos de las fluctuaciones azarosas a que se encuentran sometidas las contingencias.[25] Pero, en cada caso concreto de aplicación de una relación causal determinada, subsiste un mínimo de error —que es característico de dicha relación causal y representa una condición objetiva de la misma—, el cual depende de la magnitud de las fluctuaciones producidas al azar entre los factores determinantes que se encuentran fuera del contexto investigado. Recíprocamente, también hay una limitación correspondiente en el cumplimiento de cualquier relación de probabilidad, que resulta por el hecho de que se desprecian las interconexiones causales existentes entre los diferentes contextos. Por consiguiente, una relación causal puede surgir como una aproximación estadística del comportamiento medio de un conjunto de procesos que sufren fluctuaciones al azar en sus factores determinantes. Y, análogamente, una relación de probabilidad puede surgir también como una aproximación estadística de los efectos de un gran número de vinculaciones causales, cuando éstas se mantienen dentro de una independencia relativa sumamente grande. Por otra parte, siempre es posible enfocar un conjunto cualquiera de procesos desde un punto de vista causal, recurriendo a un contexto adecuado; y, a la vez, también es posible siempre encontrar otro contexto en el cual ese mismo conjunto pueda ser enfocado desde el punto de vista de las contingencias azarosas.[26] Así, la

[25] El tratamiento de esta relación recíproca entre azar y causalidad ha sido sugerido por David Bohm, y se puede seguir con detalle en su libro *Causalidad y azar en la física moderna,* México, U.N.A.M., Problemas Científicos y Filosóficos, 1959.

[26] Incluso quienes sustentan la posición extrema del indeterminismo cuántico, aceptan esta posibilidad. Así, por ejemplo, Paulette Février lo reconoce explícitamente con las siguientes palabras: "...Se ha establecido.

conexión causal y las contingencias azarosas representan dos aspectos necesarios e indisolubles de todos los conjuntos de procesos; de tal modo que la consideración de uno de esos aspectos corresponde a una aproximación que no se puede mantener ilimitadamente, sino que debe ser condicionada y complementada por el otro aspecto. Es más, la infinitud cualitativa del universo y su organización en niveles diferentes, suministra un marco en el cual encajan congruentemente las contingencias azarosas y las conexiones causales, como dos manifestaciones inseparables de todos los conjuntos de procesos existentes.

Entonces, cuando se encuentra una conexión regular entre procesos, que se cumple dentro de una amplia variación de las condiciones, se determina la existencia de una implicación causal. Pero, luego, a medida que se profundiza y amplía el conocimiento de esos mismos procesos, se podrá advertir que las irregularidades contingentes desempeñan un papel cada vez más destacado, el cual puede llegar a ser preponderante y acabar por imponer la sustitución de la conexión causal por una relación de probabilidad. Sin embargo, una penetración todavía mayor en el conocimiento de los procesos en cuestión puede llevar a descubrir, en el seno de las irregularidades azarosas, ciertas formas más sutiles de regularidad y, por consiguiente, la existencia de conexiones causales más profundas. De esta manera, para explicar el comportamiento de un conjunto de procesos, unas veces necesitamos de una relación causal y otras veces requerimos de una conexión de probabilidad, sin perjuicio de que más adelante se vayan corrigiendo y complementando mutuamente tales relaciones. No obstante, ni las conexiones causales, ni tampoco

de una manera general, que a toda teoría esencialmente indeterminista se le puede asociar una teoría determinista con parámetros inaccesibles a la medición; y, recíprocamente, a toda teoría determinista que contenga parámetros inaccesibles a la medición, se le puede asociar una teoría esencialmente indeterminista, eliminando los parámetros inaccesibles. Las teorías así asociadas tienen el mismo contenido físico...", *Determinismo e indeterminismo*, México, U.N.A.M., Problemas Científicos y Filosóficos, 1957, p. 245.

las relaciones de probabilidad, pueden ser consideradas como aproximaciones ilimitadas; porque en cada una de ellas se excluyen ineludiblemente algunas acciones que se producen en contextos más amplios o en otros niveles de la existencia. Por otra parte, bajo ciertas condiciones, una de estas clases de relación puede representar mejor los efectos de las acciones predominantes y ser, por ello, la mejor aproximación dentro de tales condiciones. Solo que, cuando las condiciones cambian suficientemente,[27] puede suceder que la relación adoptada tenga que ser sustituida por una conexión de la otra clase. En consecuencia, podemos formular finalmente el siguiente juicio de inclusión: *Las conexiones existentes entre dos o más conjuntos de procesos pueden ser de causalidad, o de probabilidad o, bien, de causalidad y probabilidad a la vez.*

61. *La causalidad como fundamento de la ciencia*

En el curso del desenvolvimiento histórico de la ciencia, la causalidad ha tenido varias formulaciones diferentes. Pero, no obstante la diversidad de las formas adoptadas para expresarla, siempre ha sido el medio de poner de manifiesto la conexión dinámica y recíproca existente entre todos y cada uno de los procesos objetivos, lo mismo que entre los distintos niveles de la existencia. Su expresión ha pasado desde la más sencilla consideración de causas y efectos, hasta la formulación que hemos expuesto aquí,[28] de acuerdo con el nivel actual del desarrollo científico. En todo caso, el cumplimiento de las relaciones causales es una hipótesis imprescindible y un procedimiento metódico que se utiliza en todas las investigaciones científicas. En rigor, la conexión causal es la que permite inferir las propiedades de los procesos, partiendo de los resultados obtenidos en los experimentos. Igualmente, dicha conexión

[27] En realidad, las condiciones existentes cambian de manera incesante, pero, en muchos respectos, es posible considerar que se conservan relativamente durante un tiempo finito.

[28] Véase la Sección 57.

hace posible que esos experimentos sean reproducidos en las mismas condiciones por otros investigadores, para obtener los mismos resultados. También es a través de las implicaciones causales como se vinculan unas propiedades con otras, unos procesos con otros y unos niveles con otros, para inferir las leyes que gobiernan el comportamiento de los procesos y, luego, someterlas a la prueba de su verificación experimental. En fin, la conexión causal está siempre implícita en las anticipaciones racionales y en los desarrollos teóricos que se efectúan en todos los dominios de la actividad científica.

De esa manera, mediante el proceso laborioso de su prueba reiterada en la interminable sucesión de los experimentos realizados, la causalidad se ha convertido legítimamente en uno de los fundamentos de la ciencia. Y, así, como generalización de los resultados de una multitud de experimentos y como explicación comprobada sin ninguna excepción, la causalidad suministra una perspectiva de conjunto y orienta las investigaciones posteriores, en las cuales desempeña la función de un postulado. Entonces, en cada nueva investigación que se emprende, y no obstante que ya se encuentre comprobada para los casos anteriores, la causalidad recobra su función de hipótesis elemental por verificar y, como tal, se sujeta a una nueva prueba. Y sólo después, al obtenerse otra verificación concreta de la causalidad, es cuando ésta se confirma también en ese caso en su carácter de fundamento del conocimiento. Por ello es que la causalidad refleja, dentro de la estructura interna de la ciencia, una de las formas objetivas de la existencia y la expresa así de un modo definido. A más de esto, en la medida en que se ha logrado su comprobación, la causalidad constituye un conocimiento científico cuya validez ya no se puede perder, ni tampoco deteriorar, sino que es susceptible de ser mejorada, ampliada y profundizada en las investigaciones ulteriores. Entonces, por la manera rigurosa en que se utiliza como fundamento de todos los conocimientos anteriores y, a la vez, como postulado por verificar en las nuevas investiga-

ciones, la categoría de causalidad coadyuva efectivamente a asegurar la objetividad de los resultados logrados en la experimentación y de las conclusiones establecidas en el desenvolvimiento teórico de la ciencia.

INDICE DE NOMBRES

Abraham, M., 133
Abrikosov, A. A., 106
Alexandrov, A. D., 134
Ambler, E., 68

Bernouilli, J., 123
Bichowsky, 123
Bohm, D., 18, 204, 224
Bohr, N., 25, 39, 40, 55, 138, 178, 180
Boltzmann, L., 127.
Bothe, W., 178, 209
Broglie, L. de, 18, 19, 25, 26, 28, 71, 174, 210, 215
Brouwer, L. E. J., 52, 53
Bücherer, A. H., 166
Bunge M., 39
Bussey, W. H., 73

Compton, A. H., 177, 178, 208, 209
Coriolis, G. G., 123
Coulomb, C. de, 155
Coulson, C. A., 141

D"Alembert, J. R., 123
Davis, L., iv, 167
Davisson, C., 43
Descartes, R., 121
Dirac, P. A. M., 19
Drukarev, G. F., 18

Einstein, A., i, 13, 18, 21, 84, 88, 125, 133, 147, 165, 166, 208
Engels, F., 120, 124, 195

Fermi, E., 61
Février, P., 224
Feynmann, R. P., 98
Fok, V. A., 18

Galileo, 130, 153, 160, 162
Geiger, H., 178, 209
Gell-Mann, M., iii
Germer, L. H., 43
Goldhaber, A. S., iv, 167
Goudsmit, S., 123
Grassmann, H., 52

Hayward, R. W., 68
Heisenberg, W., 19, 36, 38, 42, 72, 79, 81, 135, 204
Heitler, W., 63
Hoffman, B., 147
Hoppes, D. D., 68
Hudson, R. P., 68
Huygens, C., 121, 122

Ishiwara, J., 55
Ivanenko, D., 25

Jalatnikov, I. M., 106
Jammer, M., 33
Janossy, L., 18
Johnson, 43

Kaluza, T., 147
Kauzmann, W., 143
Kepler, J., 155
Klein, F., 71
Klein, O., 147
Kramers, H. A., 178
Kursanov, G. A., 34, 78

Landau, L., 69, 70
Langevin, P., 18, 21

Laporte, O., 67
Lee, T.D., 35, 68, 69, 99, 129, 159
Leibniz, G. W., 123
Lorentz, H. A., 13, 18, 90, 130, 161, 162, 175

Mach, E., 122, 123
Maxwell, J. C., v
Mayer, W., 147
Meliujin, S., 100, 102
Michelson, A. A., 12
Minkowski, H., 13, 168
Morley, E. W., 12
Moshinsky, M., 70

Nernst, W., 95
Newton, I., 122, 153
Nieto, M. M., iv, 167

Omelianovski, M. É., 18
Ostwald, W., 132

Pasteur, L., 66
Pauli, W., 61, 187
Pauling, L., 143
Persico, E., 94, 140, 141, 184
Planck, M., i, 16, 21, 55, 93, 95, 96, 105, 125, 127, 135, 138, 167, 175 181, 182, 190
Plücker, J., 111, 112
Poincaré, H., 51, 52
Proca, A., v

Reichenbach, H., 101
Reimann, B., 73

Salam, A., 69
Schroedinger, E., 18, 19, 25, 93, 94, 129
Silberstein, L., 73
Simón, A. W., 178
Slater, J. C., 178

Sokolov, A., 25
Sommerfeld, A., 55, 138
Stern, O., 43
Stückelberg, E. C. G., 98

Trillat, J. J., 43

Uhlenbeck, G. E., 123
Urey, H. C., 123

Veblen, O., 73, 147
Vigier, J. P., 18, 20
Von Laue, M., 146

Wallis, J., 121
Weyl, H., 13, 147
Wigner, E. P., 67
Wilson, W., 55
Wu, C. S., 68

Yang, C. N., 35, 68, 69, 99, 129, 159

Zweig, G., iii

Se imprimió el día 6 de Abril de 1979 en los talleres de Ediciones Sol, Sánchez Colín 20, México 16, D. F., y terminado en los talleres de ENCUADERNACION SAGITARIO, S. A., Benito Juárez 92-A, México 13, D. F.

Se imprimieron 3,000 ejemplares